



**Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt e.V.**  
in der Helmholtz-Gemeinschaft



**Technische  
Universität  
Braunschweig**

# **Simulative Untersuchung und Bewertung Vehicle-to-Infrastructure basierter An- fahrstrategien an Lichtsignalanlagen**

**Studienarbeit**

angefertigt von

**B. Eng. Michael Düring**

Matrikel-Nummer: 4107466

am

**Institut für Verkehrssystemtechnik (DLR)**

der

**Technischen Universität Braunschweig**

Betreuer:

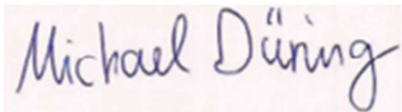
**Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer**

**Dipl.-Ing. Tobias Lorenz**

**JULI 2011**

# Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich eidesstattlich, dass ich diese Arbeit eigenständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe.

A handwritten signature in blue ink on a light pink rectangular background. The signature reads "Michael Düring" in a cursive script.

Braunschweig den 14. Juli 2011

# Kurzfassung

Das Institut für Verkehrssystemtechnik im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) beschäftigt sich, unter anderem, mit der Entwicklung und Evaluation von Fahrerassistenzsystemen. In diesem Zusammenhang ist das DLR Mitglied im Car-2-Car Communication Consortium, welches eine führende Rolle bei der Erarbeitung von Standards (IEEE 802.11p) für die drahtlose Übertragung von Informationen zwischen Fahrzeugen sowie Fahrzeugen und kooperativer Verkehrsinfrastruktur definiert. Erste Demonstrationen zeigen den sinnvollen Einsatz dieser Technologie für künftige Fahrerassistenzsysteme. Das Ziel dieser Systeme ist es die Sicherheit und die Effizienz im Straßenverkehr weiter zu erhöhen.

Im Entwicklungsprozess von Assistenz- und Automationssystemen werden verschiedene Schritte, beginnend bei Simulationsstudien zur Abschätzung der Auswirkungen eines neuartigen Systems im Verkehr bis hin zur Evaluation von Prototypen in Feldversuchen, durchlaufen. In der vorliegenden Arbeit wird das Anfahrverhalten von 50 Fahrzeugen simuliert, die sich in einem Rückstau vor einer Lichtsignalanlage (LSA) befinden. Der Aufbau der Simulation besteht aus einer LSA gesteuerten Kreuzung, deren einzige Fahrtrichtung jeweils die Geradeausfahrt ist. Als Simulationsumgebung wird SUMO verwendet.

Das Ziel der Arbeit ist die Untersuchung und Auswertung von drei unterschiedlichen Anfahrscenarien. Zum einen wird das derzeitige Anfahrverhalten abgebildet. Zum anderen werden zwei Fahrerassistenzsysteme betrachtet. Ein Assistenzsystem unterstützt den Fahrer, indem ihm die Restzeit der Rotphase angezeigt wird bzw. indem der Assistent den Fahrer beim Beschleunigungsvorgang unterstützt. Der andere Assistent übernimmt vollautomatisch die Längsführung der Fahrzeuge. Für die beiden Assistenten wird die Vehicle-to-X Technologie mit einer Durchdringungsrate von 100% vorausgesetzt.

Es wird gezeigt, dass durch die Variation der Anfahrstrategie sowohl eine Verringerung der Aufenthaltsdauer des letzten Fahrzeugs in der Simulation (im Folgenden Simulationszeit) von 25% bis 85% als auch die Reduzierung der Anzahl der Grünphasen der LSA zum Räumen der Kreuzung von 14 auf 4 möglich ist. Die Einsparungsmöglichkeiten hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs liegen zwischen 21% und 94%. Weiterhin wurden mit der Grünphasendauer und dem Beschleunigungswert zwei Parameter identifiziert, die bedeutenden

Einfluss auf den Ablauf der Simulation und das Potential zur Reduzierung der Simulationszeit und des Kraftstoffverbrauchs bzw. der Emission haben.

# Abstract

The Institute of Transportation Systems (TS) of the German Aerospace Center (DLR) deals with the development and evaluation of driver assistance systems. The DLR is a member of the Communication Consortium which plays a leading role in the development of wireless communication standards. Initial demonstrations show the use of this technology for future driver assistance systems. The objective of these systems is to increase the safety and the efficiency of the traffic.

There are different steps in the process of developing assistance systems. Starting with studies concerning the assessment of a new system prototypes have to be evaluated. This thesis deals with the simulation of the start performance of 50 vehicles in front of a traffic light. The simulation involves an intersection controlled by traffic lights and is performed with the SUMO open source network simulator.

The objective of this thesis is to analyse three different start performance scenarios. The first scenario maps the current start performance, while the others deal with driver assistance systems. One of them supports the driver by showing the remaining time of the current and upcoming light phases and by helping the driver with the acceleration process. The other system automatically assumes longitudinal guidance. The simulations dealing with the two driver assistance systems require a penetration rate with vehicle-to-x technology of 100%.

It can be shown that with the variation of the start performance a decrease of travel time by 25% up to 85% is possible. The number of green phases can be reduced from 14 to 4. The fuel consumption and the emissions can also be reduced by between 21% and 94%. In addition, two important values (the duration of the green phase and the acceleration) which influence the results of the simulations substantially have been identified.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>III</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Theoretischer Hintergrund.....</b>	<b>3</b>
2.1 Lichtsignalanlagen .....	3
2.2 Vehicle-2-X Kommunikation.....	3
2.3 Simulationsumgebung „SUMO“ .....	6
2.4 Untersuchungen kooperativer Assistenzsysteme an LSA.....	7
<b>3 Simulation.....</b>	<b>9</b>
3.1 Aufbau der Simulation.....	9
3.2 Untersuchte Szenarien.....	11
3.2.1 Das verzögerte Anfahren - „Normal behaviour“ .....	11
3.2.2 Das Anfahren mit LSA Assistenten - „Traffic light assistant“ .....	12
3.2.3 Das Anfahren in einer Fahrzeugkolonne - „driving in Platoons“ .....	13
3.3 Variable Parameter .....	14
3.3.1 Schaltzeiten der LSA.....	15
3.3.2 Beschleunigungen.....	16
3.4 Start- und Abbruchbedingungen .....	17
3.5 Skripte zum Betreiben der Simulation .....	18
3.5.1 Sumo Manager.....	18
3.5.2 Subskripte .....	21
3.6 Programmierung .....	22
3.6.1 Das verzögerte Anfahren - „Normal behaviour“ .....	22
3.6.2 Das Anfahren mit LSA Assistenten - „Traffic light assistant“ .....	28
3.6.3 Das Anfahren in einer Fahrzeugkolonne - „driving in Platoons“ .....	28
3.7 Ablauf der Simulation .....	31
<b>4 Auswertung .....</b>	<b>33</b>

4.1	Simulationszeiten .....	33
4.2	Kraftstoffverbrauch .....	43
4.3	Gesamtbetrachtung .....	49
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>53</b>
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>55</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>57</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>58</b>

# Abkürzungsverzeichnis

LSA	Lichtsignalanlage(n)
SUMO	Simulation of Urban Mobility (Simulationsumgebung)
TraCI	Traffic Control Interface
Vehicle-2-X	Vehicle-to-X, bezeichnet die Kommunikation zwischen einem Fahrzeug und einem anderen Empfänger und/oder Sender



# 1 Einleitung

Das Institut für Verkehrssystemtechnik im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) beschäftigt sich, unter anderem, mit der Entwicklung und Evaluation von Fahrerassistenzsystemen. In diesem Zusammenhang ist das DLR Mitglied im Car-2-Car Communication Consortium, welches eine führende Rolle bei der Erarbeitung von Standards (IEEE 802.11p) für die drahtlose Übertragung von Informationen zwischen Fahrzeugen sowie Fahrzeugen und kooperativer Verkehrsinfrastruktur definiert. Erste Demonstrationen zeigen den sinnvollen Einsatz dieser Technologie für künftige Fahrerassistenzsysteme. Das Ziel dieser Systeme ist es die Sicherheit und die Effizienz im Straßenverkehr weiter zu erhöhen.

Im Entwicklungsprozess von Assistenz- und Automationssystemen werden verschiedene Schritte, beginnend bei Simulationsstudien zur Abschätzung der Auswirkungen eines neuartigen Systems im Verkehr bis hin zur Evaluation von Prototypen in Feldversuchen, durchlaufen. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Simulation und anschließende Untersuchung sowie Auswertung von drei unterschiedlichen Anfahrscenarien. Es wird das Anfahrverhalten von 50 Fahrzeugen untersucht, die sich in einem Rückstau vor einer Lichtsignalanlage (LSA) befinden. Der Aufbau der Simulation besteht aus einer durch LSA gesteuerten Kreuzung, deren einzige Fahrtrichtung jeweils die Geradeausfahrt ist. Als Simulationsumgebung wird SUMO verwendet. Durch eigens entworfene Skripte in Python, die eine Verbindung zum TraCI (Traffic Control Interface) aufbauen, wird die statische Simulationsumgebung zu einer dynamisch veränderbaren Oberfläche aufgewertet.

Im ersten Kapitel wird der theoretische Hintergrund erläutert. Dazu zählen neben der Vehicle-2-X Kommunikation auch eine Betrachtung der Lichtsignalanlagen und der verwendeten Simulationsumgebung SUMO. Eine Sichtung bereits durchgeführter Untersuchungen schließt das erste Kapitel ab.

Im zweiten Kapitel wird die Simulation beschrieben. Dabei wird zunächst der Aufbau der Simulation erläutert. Anschließend werden die drei Anfahrscenarien vorgestellt. Die variierten Parameter Schaltzeit der LSA und die Beschleunigung sind im nachfolgenden Abschnitt thematisiert. Weiterhin wird auf die verwendeten Start- und Abbruchbedingungen

eingegangen. Die Skripte, die zum Betreiben der Simulation von Bedeutung sind, werden zusammen mit der programmierungstechnischen Umsetzung der Anfahrszenarien vorgestellt. Abschließend wird der Ablauf der Simulation und die Erfassung der Daten zur Auswertung beschrieben.

Im dritten Kapitel befindet sich die Auswertung der Simulationen. Hierbei wird auf die Parameter Simulationszeit (gleichbedeutend mit der Aufenthaltsdauer des letzten Fahrzeugs in der Simulation) sowie die erforderliche Anzahl der Grünphasen und den Kraftstoffverbrauch der unterschiedlichen Anfahrszenarien eingegangen. Eine Gesamtbetrachtung stellt anschließend den Zusammenhang zwischen den Parametern untereinander her.

Eine Zusammenfassung der aus der Auswertung gezogenen Rückschlüsse wird im Kapitel fünf gegeben. Der Ausblick schließt die Arbeit ab.

## 2 Theoretischer Hintergrund

Im folgenden Abschnitt werden die grundlegenden Eigenschaften von Lichtsignalanlagen (im Folgenden LSA) gesteuerten Kreuzungen beschrieben. Anschließend wird die sich in der Entwicklung befindliche Kommunikation zwischen unterschiedlichen Fahrzeugen und die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und kooperativer Verkehrsinfrastruktur (Vehicle-2-X) erörtert. Nachstehend wird die zur Simulation verwendete Simulationsumgebung SUMO vorgestellt. Eine Sichtung bereits durchgeführter Untersuchungen zu ähnlichen Fragestellungen schließt die theoretische Betrachtung ab.

### 2.1 Lichtsignalanlagen

Schaltungen von LSA sind auf vielbefahrenen Straßen zur aktiven Regelung und Verbesserung des Verkehrsflusses unerlässlich. Durch sie werden die Hauptverkehrsströme schnellstmöglich durch die Innenstädte oder Ballungszentren geleitet. Diese Regelung bringt jedoch auch Nachteile mit sich. Je nach Anzahl der vor einer LSA stehenden Fahrzeuge werden Abgase und Lärm erzeugt. Zusätzlich ist beim Anfahren ein erhöhter Kraftstoffverbrauch zu verzeichnen, der sich unter anderem in der steigenden CO<sub>2</sub> Emission zeigt.

Dabei stehen momentan die zwei Möglichkeiten zur Verbesserung dieser Herausforderung zur Verfügung. Einerseits können während der Hauptverkehrszeiten könnte zur effizienteren Nutzung der Straße eine angepasste Schaltzeiten Abhilfe schaffen. Entsprechende Richtwerte und Kriterien finden sich in den Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA, vgl. [FGSV10]). Andererseits können die Fahrzeuge, und somit auch direkt der Verkehrsfluss, beeinflusst werden. Bei beiden Lösungsansätzen kann die Vehicle-2-X Kommunikation Abhilfe schaffen.

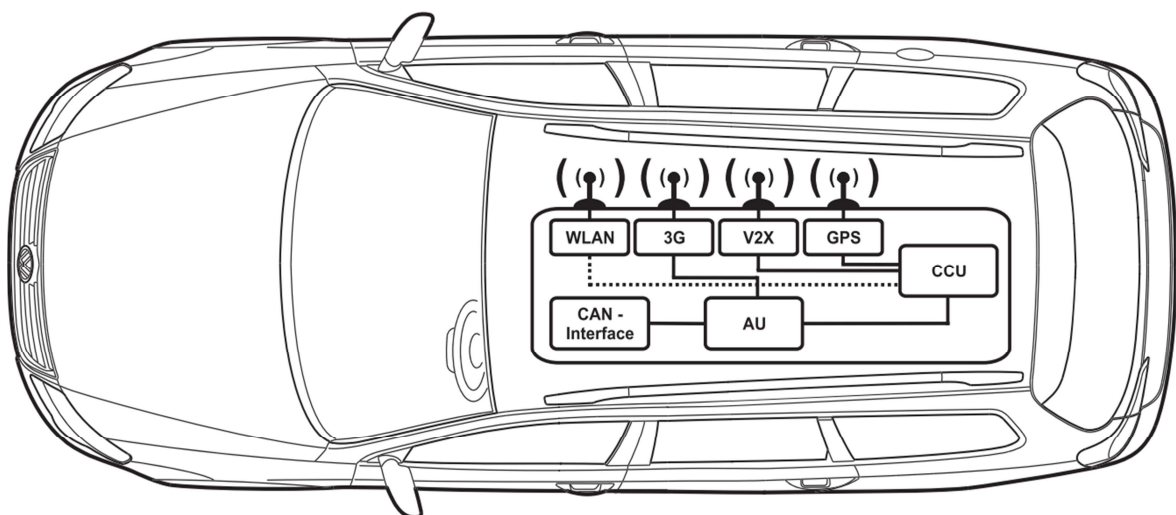
### 2.2 Vehicle-2-X Kommunikation

Mit der Kommunikation der Fahrzeuge untereinander steht den Fahrern eine Vielzahl neuer Informationen zur Verfügung, die zu einer sichereren und effizienteren Mobilität führen. Beispielsweise kann der Gegenverkehr auf einer Landstraße oder Autobahn vor Gefah-

rensituationen oder Staus warnen. Außerdem ist denkbar, dass Fahrzeuge beim Anfahrvorgang in einem Stau oder vor einer Lichtsignalanlage miteinander kommunizieren, um eine optimale Anfahrstrategie zu ermitteln. Weitere Applikationen sind in den entsprechenden Quellen nachzulesen (vgl. [ETSI09] und [SIMTD])

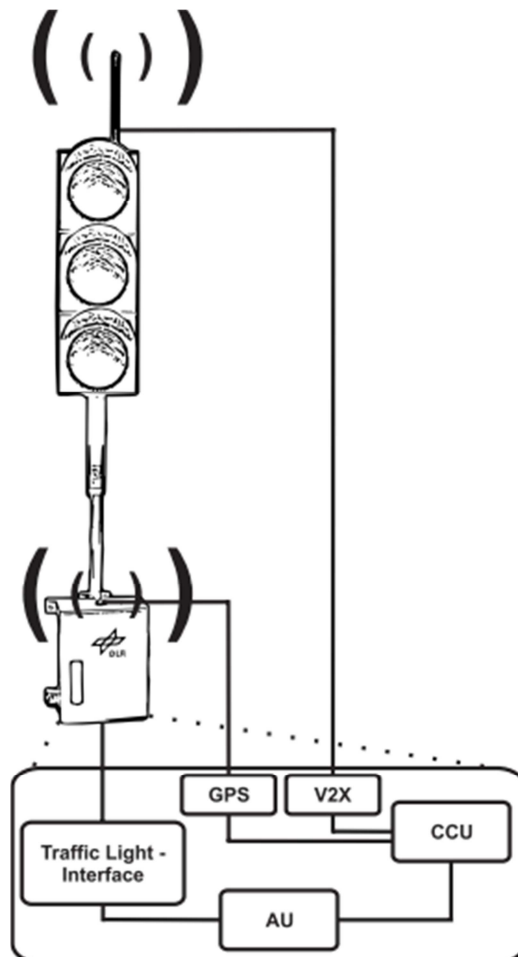
Um diese Kommunikation unter den Fahrzeugen zu ermöglichen, mussten Komponenten entwickelt und an den entsprechenden Stellen installiert werden. Dabei gibt es mit der Application Unit (AU) und der Communication and Control Unit (CCU) zwei Hauptkomponenten der Kommunikation. In Abbildung 2-1 sind die Komponenten im Fahrzeug gezeigt.

Die AU führt Programme aus und generiert die Informationen. Diese tritt in bidirektionale Kommunikation mit dem CAN-Interface. Das bezieht sich somit zum einen auf das Auslesen der Sensordaten und zum anderen auf die Steuerung der Aktorik im Fahrzeug. Außerdem werden die Informationen an die CCU übermittelt. Mithilfe von GPS Signalen werden Positionsinformationen und ein synchronisierter Zeitstempel auf das Fahrzeug übertragen. Die CCU sendet die Information via Vehicle-2-X Kommunikation an die anderen Fahrzeuge oder die kooperative Infrastruktur. Sie werden im Frequenzband von 5,85 bis 5,925 GHz durch den eigens für diese Kommunikation geschaffenen WLAN Standard IEEE 802.11p gesendet (vgl. [ECC07]).



**Abbildung 2-1: Die Technik der Vehicle-2-X Kommunikation im Fahrzeug [AIM11]**

Die Kommunikation kann zwischen zwei Fahrzeugen oder aber auch zwischen einem Fahrzeug und beispielsweise einer Lichtsignalanlage stattfinden. Bei der Kommunikation zwischen einer Lichtsignalanlage und den Fahrzeugen können die Restlaufzeiten der aktuellen Phase, sowie die Länge der folgenden Phasen übermittelt werden. Der Aufbau einer solchen LSA mit Vehicle-2-X Kommunikation ist in Abbildung 2-2 gezeigt. Sie besteht ebenfalls aus einer AU, die die Applikationen ausführt und Daten vom Traffic Light-Interface gesendet bekommt. Die generierten Informationen leitet die AU schließlich an die CCU weiter. Das Traffic Light-Interface steuert die LSA während die CCU die Informationen über die Vehicle-2-X-Kommunikation anderen Verkehrsteilnehmern zur Verfügung stellt.



**Abbildung 2-2: Aufbau einer LSA mit Vehicle-2-X Kommunikation [AIM11]**

## 2.3 Simulationsumgebung „SUMO“

Das für die Durchführung der Untersuchungen verwendete Simulationsumgebung „SUMO“ [TS11] wurde am Institut für Verkehrssystemtechnik (TS) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) entwickelt. Das Akronym „SUMO“ steht hierbei für den englischen Begriff „**S**imulation of **U**rban **M**obility“. Das Programm eignet sich neben der Vorhersage von Verkehrsflüssen in urbanen Gebieten auch für die virtuelle Erprobung von kooperativen Fahrerassistenzsystemen mit dem Wirkfeld Verkehrseffizienz.

Das Programm arbeitet mit mehreren Konfigurationsdateien, in denen jeweils unterschiedliche Parameter spezifiziert sind. Zu Beginn müssen Knotenpunkte (nodes) im X-Y-Koordinatensystem festgelegt werden. Diesen Punkten können, neben einer einmaligen Identität, auch bestimmte Eigenschaften wie „Vorfahrtsregeln“ oder „LSA“ zugewiesen werden. Anschließend werden die Knotenpunkte durch Straßen verbunden. In den sogenannten „Edges“-Dateien können für ausgewählte Straßenzüge mehrere Spuren in einer bestimmten Richtung sowie Geschwindigkeitsbegrenzungen hinzugefügt werden. Darüber hinaus werden besondere Eigenschaften von Straßen und deren Verzweigungen in den „Typ“ und „Connection“-Dateien bestimmt. Mit dem beiliegenden Compiler „net-convert.exe“ wird aus den einzelnen Konfigurationsdateien eine Gesamtdatei erzeugt. Im nächsten Schritt erfolgt die Implementierung der Fahrzeuge durch die „routes“-Datei. In dieser können verschiedene Fahrzeugklassen deklariert und bestimmten Routen zugewiesen werden. Außer der Länge der Fahrzeuge, deren Beschleunigungsfähigkeit und der Bremsverzögerung der Fahrzeuge werden Startzeitpunkt und Höchstgeschwindigkeit bestimmt. Sind alle Parameter gesetzt, kann eine GUI-Oberfläche geladen und die Analyse gestartet werden. Um die Simulation verfolgen zu können, kann der „Gaming Mode“ gestartet werden. Durch das Setzen einer bestimmten Zeitverzögerung wird die Simulation zusätzlich zu Gunsten der besseren Übersichtlichkeit beeinflusst. Alternativ zu dieser grafischen Oberfläche kann eine Konsolenausgabe gestartet werden, die bei einer größeren Anzahl von Simulationen einen deutlichen Zeitvorteil bringt.

Die Möglichkeiten des Simulationsprogrammes sind weitaus größer als die bloße Ausführung von statischen Dateien. So kann mithilfe von Skripten, die in diversen Programmiersprachen geschrieben werden können, eine Verbindung zum TraCI (Traffic Control Interface) hergestellt und die SUMO-Simulationsumgebung zu einer interaktiven Oberfläche

aufgewertet werden. Das Auslesen der Phasen von Lichtsignalanlagen sowie deren Schaltung ist dabei ebenso möglich wie das gezielte Auslesen und Aufprägen von Beschleunigungs- oder Geschwindigkeitsverläufen auf gewisse Fahrzeuge innerhalb der Simulation. In diesem Fall läuft die Simulationsumgebung als Server-Applikation und das Skript übernimmt die Kontrolle der einzelnen Elemente.

Durch diese Art der dynamischen Simulation, ist es möglich, eine Vielzahl unterschiedlicher Szenarien zu untersuchen. Damit am Ende der Untersuchungen stochastisch abgesicherte Ergebnisse vorliegen, muss eine ausreichende Anzahl von zufälligen Simulationsanordnungen für jedes Szenario erzeugt werden.

### **2.4 Untersuchungen kooperativer Assistenzsysteme an LSA**

In diesem Abschnitt werden drei Veröffentlichungen vorgestellt, die sich ebenfalls mit der Simulation von Verkehrsflüssen an LSA beschäftigen. Dabei werden das Ziel, die Vorgehensweise und die Ergebnisse beschrieben.

#### Ökologische Einflüsse ausgewählter Verkehrsmanagementansätze: [OEAV]

Bei dieser Untersuchung stand die Betrachtung der ökologischen Auswirkungen von Verkehrsmanagementmaßnahmen im Vordergrund. Ferner sollte untersucht werden, ob die Betrachtung der Größen des Verkehrsmanagements (Zeit, Geschwindigkeit oder Rückstaulänge) zur Reduzierung der ökologischen Kennwerte (Schadstoffemissionen, Kraftstoffverbrauch) ausreicht. Dazu wurde eine Simulation in SUMO erstellt und das Traffic Control Interface um ein Modell der Schadstoffemission erweitert. Mit dieser Anwendung wurden anschließend Versuche durchgeführt, die eine Abhängigkeit zwischen den Kenngrößen des Verkehrsmanagements und ökologischen Kenngrößen zeigen sollten. Die Versuche bezogen sich unter anderem auf die Performanz an Lichtsignalanlagen.

Das Ergebnis der Untersuchungen ist, dass die Verbesserung der Kenngrößen des Verkehrsmanagements ausreicht, da eine Verringerung der Reisezeit oder der Rückstaulänge ebenfalls die Schadstoffemissionen und den Kraftstoffverbrauch verringert.

### Simulation of modern Traffic Lights Control Systems using the open source Traffic Simulation SUMO: [STLCS]

Ziel der Untersuchung war die Ermittlung des Einflusses eines neuen Mechanismus zur Überwachung und Verbesserung des Verkehrsflusses an LSA gesteuerten Kreuzungen. Dazu wurde eine existierende Strecke mithilfe von digitalem Kartenmaterial in SUMO eingefügt. Der getestete Mechanismus hat als Eingangsgröße die Anzahl der Fahrzeuge vor einer LSA. Dabei werden die Grün- und Rotphasen entsprechend des jeweiligen Verkehrsaufkommens geregelt.

Das Resultat der Untersuchungen ist, dass bei einem ungleichen Verkehrsaufkommen aus den unterschiedlichen Richtungen eine solche Grünphasensteuerung einen deutlichen Vorteil bringt. Bei kleinen und ausgeglichenen Verkehrsaufkommen bringt diese Art der LSA Steuerung jedoch keinen Vorteil. Zudem wird darauf hingewiesen, dass eine zu große Ansammlung von Fahrzeugen vor der LSA vermieden werden muss, damit das System effektiv arbeitet.

### VANET Simulation Environment with Feedback Loop and its Application to Traffic Light Assistance: [VATLA]

Das Ziel der Untersuchung war das Potential der VANETs (vehicular ad-hoc networks) mithilfe einer in SUMO durchgeführten Simulation zu ermitteln. Dabei wurden die Parameter aus einem realistischen Verkehrsmodell durch das Traffic Control Interface (TraCI) auf den Netzwerksimulator (SUMO) übertragen. Die Fahrzeuge bewegten sich auf einer ovalen Strecke, dessen Umfang der mittleren Entfernung zwischen zwei Lichtsignalanlagen entspricht. Weiterhin ist die LSA mit der Green Light Optimal Speed Advisory (GLOSA) Technologie ausgestattet. Dies bedeutet, dass die LSA ihre aktuellen und zukünftigen Signalphasen mithilfe der Vehicle-2-X Kommunikation senden. Die Fahrzeuge mit Vehicle-2-X Kommunikation können somit die Geschwindigkeit optimal an die Grünphasen anpassen oder den Motor vor der LSA abschalten.

Das Fazit der Untersuchung ist, dass die VANETs ein Potential zur Kraftstoffverbrauchseinsparung besitzen. Zur weiteren Verifizierung sollen Feldversuche im Rahmen des AutoNomos-Projekt der Freien Universität Berlin stattfinden.

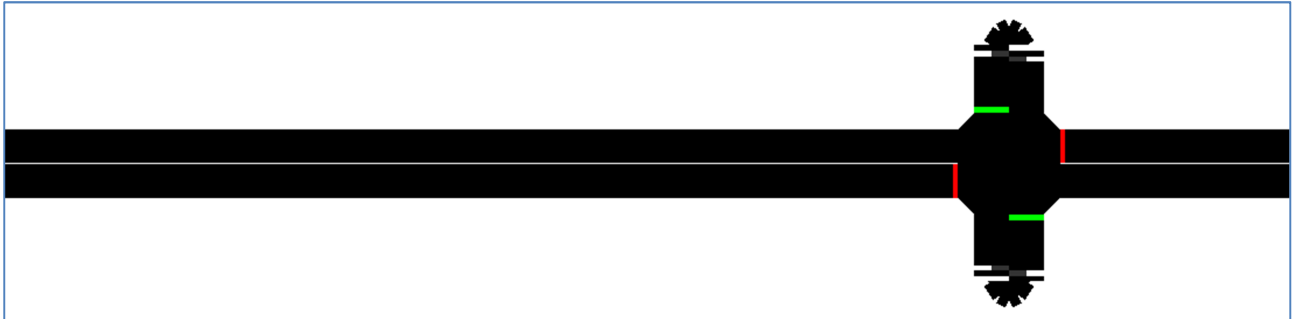


## 3 Simulation

Im folgenden Abschnitt wird der Aufbau und Ablauf der Simulation beschrieben. Zunächst werden Rahmenbedingungen der Simulation näher erläutert und anschließend die drei Anfahrstrategien und die Variationsparameter der unterschiedlichen Simulationen erklärt. Die Anfangs- und Abbruchbedingungen, die die Vergleichbarkeit aller Simulationen sicherstellt, sind Thema des darauffolgenden Abschnitts. Schließlich werden die in Python programmierten Skripte ausführlich vorgestellt, um einen Einblick in die Funktionsweise der Simulation zu geben. Die Umsetzung der Szenarien in Python schließt dieses Kapitel ab.

### 3.1 Aufbau der Simulation

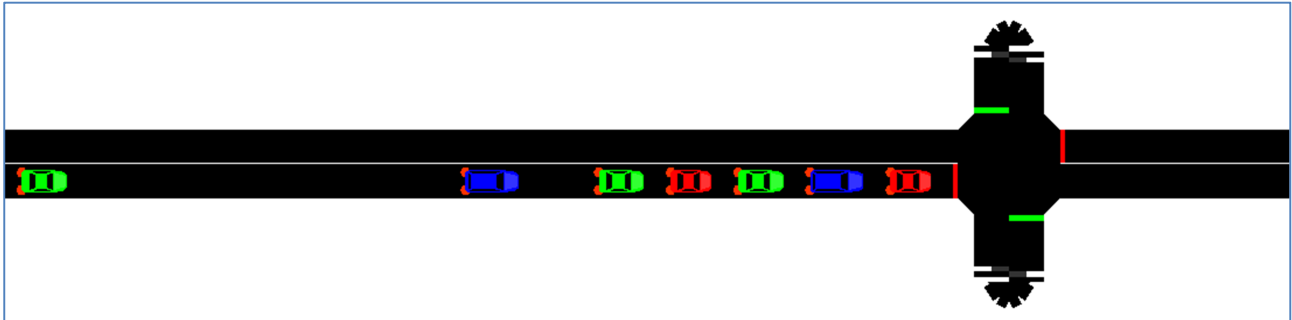
Die Simulation besteht aus einer Kreuzung, die durch eine LSA kontrolliert wird. Die Simulationsumgebung ist in Abbildung 3-1 dargestellt.



**Abbildung 3-1: Der untersuchte Simulationsaufbau**

Die Fahrzeuge nähern sich der Kreuzung mit einer Maximalgeschwindigkeit von  $50 \frac{km}{h}$  ausschließlich von der linken Seite. Die Kreuzung besitzt nur eine Spur in jede Richtung und erlaubt als Fahrtrichtung nur die Geradeausfahrt. Diese Vereinfachung wird getroffen, da davon ausgegangen wird, dass parallele Fahrspuren das Verhalten der Fahrzeuge nicht beeinflussen und jede Fahrtrichtung für sich eine autonome Verhaltensweise aufweist. Zur ersten Abschätzung ist das vereinfachte, aber praxisnahe Verhalten der Fahrzeuge einer Fahrspur mit nur einer erlaubten Fahrtrichtung ausreichend. Die 50 in die Si-

mulation geladenen Fahrzeuge fahren an die oben gezeigte Kreuzung heran und warten dort, bis die LSA auf Grün umspringt (siehe Abbildung 3-2).



**Abbildung 3-2: Anbremsvorgang der Fahrzeuge an die LSA**

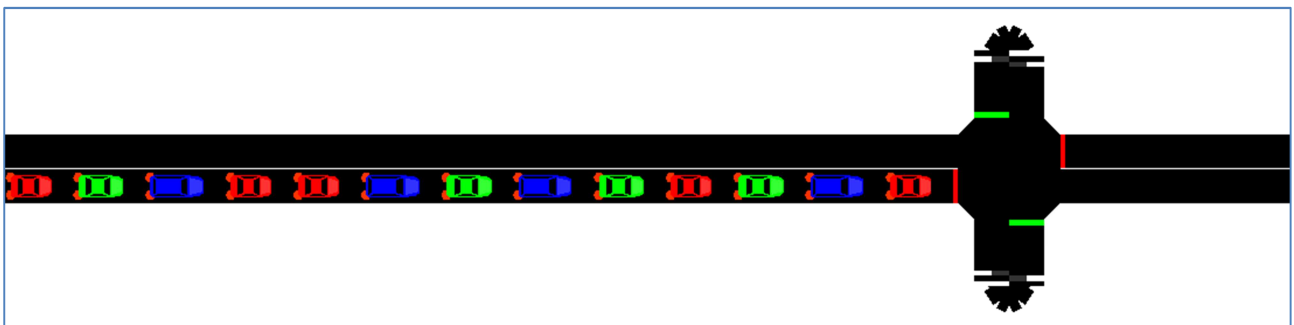
Es ist möglich bis zu drei unterschiedliche Fahrzeugklassen zu erzeugen. In dieser Simulation werden Fahrzeuge der „Fox“- „Golf“- und „Passat“-Klasse nachempfunden. Dieser Querschnitt der Fahrzeugklassen Kleinwagen, Kompaktwagen und Mittelklassewagen soll eine gewisse Variation im Stau an der LSA darstellen. Hierbei ist darauf hinzuweisen, dass unabhängig von der Fahrzeugklasse ein minimaler Sicherheitsabstand von 2,5 m in der Fahrzeuglänge enthalten ist. Daher stehen alle Fahrzeuge bei der Benutzung der GUI-Oberfläche gleichweit voneinander entfernt. Sie besitzen zur besseren Unterscheidung eine der Fahrzeugklasse zugeordneten Farbe. Weiterhin muss zur Untersuchung der Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs eine Emissionsklasse gesetzt werden (vgl. [UWB11] und [OEAV]). Diese wurde bei allen Fahrzeugklassen zu „passenger“ (= Privater PKW) gesetzt. Die Variation besteht in der Länge und den Massen der Fahrzeuge. Die wichtigsten verwendeten Fahrzeugdaten sind in Tabelle 3-1 dargestellt.

	Fox	Golf	Passat
Länge	3,8 m + 2,5 m gesamt: 6,3 m	4,2 m + 2,5 m gesamt: 6,7 m	5,0 m + 2,5 m gesamt: 7,5 m
Emissionsklasse	passenger	passenger	passenger
Farbe	rot	grün	blau

**Tabelle 3-1: Parameter der Fahrzeugklassen [VW11]**

## 3.2 Untersuchte Szenarien

Um den Einfluss von unterschiedlichen Anfahrszenarien abschätzen zu können, werden insgesamt drei verschiedene Szenarien untersucht. Dabei werden das „verzögerte Anfahren“, das „Anfahren mit LSA Assistenten“ und das „Anfahren in einer Fahrzeugkolonne“ betrachtet. Im folgenden Abschnitt werden diese Szenarien anhand eines Beispiels genauer erläutert. Der Ausgangszustand aller Anfahrstrategien ist in Abbildung 3-3 gezeigt.



**Abbildung 3-3: Beispielhafte Simulation für die unterschiedlichen Anfahrstrategien**

### 3.2.1 Das verzögerte Anfahren - „Normal behaviour“

Das alltagsnahe Anfahren an LSA wird durch das Szenario „Normal behaviour“ abgebildet. Die Fahrzeuge fahren mit einer Verzögerung zwischen einer und drei Sekunden (vgl. [FEL01] & [FGSV10]) los. Da die Fahrzeugführer in der Realität oftmals nicht durchgehend die LSA beobachten, fahren viele von ihnen später los als sie es eigentlich könnten. Neben diesem Umstand werden auch die in der Realität auftretenden unterschiedlich großen Sicherheitsabstände zwischen den Fahrzeugen und die unterschiedlichen Beschleunigungen der Fahrzeuge durch die Verzögerungen berücksichtigt. Abbildung 3-4 zeigt das Verhalten der Fahrzeuge in der Simulation.

Das erste Fahrzeug hat die Simulation bereits verlassen. Die nachfolgenden vier Fahrzeuge sind mit einem gewissen Zeitverzug angefahren. Das sechste Fahrzeug (das blaue, fünfte von rechts) könnte losfahren, tut dies wegen der Verzögerung jedoch nicht.



**Abbildung 3-4: Das verzögerte Anfahren**

### **3.2.2 Das Anfahren mit LSA Assistenten - „Traffic light assistant“**

Mit dem LSA Assistenten wird dem Fahrer mitgeteilt, wie lange er noch auf die Grünphase warten muss und wie schnell er zu beschleunigen hat, damit möglichst viele Fahrzeuge die LSA während der Freigabezeit passieren können. Dabei erkennt ein Modul auf der LSA, wie weit das jeweilige Fahrzeug noch von der LSA entfernt ist und wie viel Sicherheitsabstand einzuhalten ist. Abbildung 3-5 zeigt das Verhalten der Fahrzeuge in der Simulation. Hat ein Fahrzeug einen genügend großen Sicherheitsabstand zu dem vor ihm fahrenden Fahrzeug aufgebaut, so fährt es los. Die Fahrzeuge fahren demnach dichter hintereinander als im vorherigen Szenario. Bei diesem Szenario wird vorausgesetzt, dass alle beteiligten Fahrzeuge die für die Vehicle-to-X erforderlichen Komponenten besitzen.

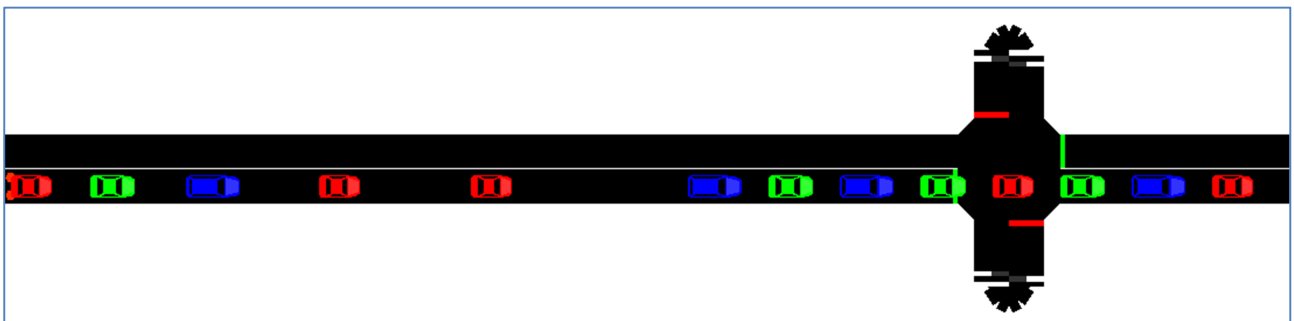


**Abbildung 3-5: Das Anfahrverhalten mit dem LSA Assistenten**

### 3.2.3 Das Anfahren in einer Fahrzeugkolonne - „driving in Platoons“

„Das Anfahren in einer Fahrzeugkolonne“ stellt die größte Veränderung des alltagsnahen Anfahrens an LSA dar. Bei dieser Art des Assistenzsystems werden die Fahrzeuge mithilfe der von der LSA zur Verfügung gestellten Daten längsgeführt. Unter Beachtung der erlaubten Höchstgeschwindigkeit, der optimalen Beschleunigung und der Entfernung der Fahrzeuge zur LSA, werden diejenigen Fahrzeuge ermittelt, die die Kreuzung innerhalb der Freigabezeit der LSA überqueren können. Dabei beträgt der Sicherheitsabstand während der Fahrt, genau wie im Stand 2,5 m. Dieser ist für eine Geschwindigkeit von  $50 \frac{km}{h}$  sehr gering. Da jedoch alle Fahrzeuge kooperativ vollautomatisch längsgeführt werden, ist dieser ausreichend. Des Weiteren soll diese Simulation lediglich den Nutzen eines solchen Szenarios darlegen. Rechtliche Fragestellungen, wie beispielsweise Haftung bei Unfällen, werden nicht weiter beleuchtet.

Aus Abbildung 3-6 wird das Verhalten der Fahrzeugkolonne ersichtlich. Die Fahrzeuge, die die Überquerung schaffen, fahren mit gleicher Geschwindigkeit und dem kleinstmöglichen Sicherheitsabstand los. Die anderen Fahrzeuge fahren individuell auf die LSA zu und bremsen dann ab. Beim Umschalten der LSA auf die anschließende Grünphase werden die Fahrzeuge der nächsten Fahrzeugkolonne ermittelt. Diese passiert die LSA dann ihrerseits mit dem kleinstmöglichen Sicherheitsabstand. Bei diesem Szenario wird eine Durchdringungsrate mit der Vehicle-2-X Kommunikationstechnologie von 100 % vorausgesetzt.



**Abbildung 3-6: Das Verhalten der Fahrzeuge im Szenario „Anfahren in einer Fahrzeugkolonne“**

### 3.3 Variable Parameter

Um ein möglichst großes Feld an Simulationsergebnissen abdecken zu können, werden unterschiedliche Simulationsparameter variiert. Die Folgenden kommen in Frage:

- Anzahl der Fahrzeugklassen
- Maximalgeschwindigkeit
- Anzahl der Fahrzeuge
- Abbiegeverhalten
- Reihenfolge der Fahrzeuge
- Anzahl der Simulationen
- Schaltzeit der LSA
- Beschleunigung der Fahrzeuge

#### Anzahl der Fahrzeugklassen:

Bei der Anzahl der Fahrzeugklassen wurde mit drei unterschiedlichen Klassen ein in erster Näherung ausreichender Schnitt durch den innerstädtischen Verkehr gebildet. In weitergehenden Untersuchungen wäre die Einführung weiterer Fahrzeugklassen denkbar.

#### Maximalgeschwindigkeit:

Die Simulation stellt die Situation vor einer LSA im innerstädtischen Gebiet dar. Daher ist eine Maximalgeschwindigkeit von  $50 \frac{km}{h}$  festgelegt. Für die Untersuchung des Verhaltens an außerörtlichen LSA müsste die Geschwindigkeit entsprechend angepasst werden.

#### Anzahl der Fahrzeuge:

Die Anzahl der Fahrzeuge soll in dieser Simulation ein Maximum von 50 Fahrzeugen nicht übersteigen. Diese Begrenzung besteht, da das Anfahrverhalten von mehr Fahrzeugen kein anderes Verhalten aufweist.

### Abbiegeverhalten:

In dieser Simulation soll das Verhalten der Fahrzeuge bei erlaubtem Abbiegen nicht einbezogen werden. Die Simulation liefert Ergebnisse für die Fahrspuren an Kreuzungen vor LSA, die als Fahrtrichtung nur die Geradeausfahrt zulassen.

### Reihenfolge der Fahrzeuge / Anzahl der Simulationen:

Durch die zufällige Reihenfolge der Fahrzeuge und die Mittelung über 200 durchgeführte Simulation pro Szenario hat die Reihenfolge der Fahrzeuge keinen Einfluss auf das Simulationsergebnis. Die Anzahl der Simulationen muss mindestens 50 betragen, damit die stochastische Auswertung gültig ist. Eine weitere Steigerung der Anzahl der Simulationen würde genauere Ergebnisse erzeugen. Die Verbesserung liegt jedoch im Nachkommastellenbereich und ist für diese erste Näherung unerheblich.

Somit wird die Reihenfolge der Fahrzeuge als Variable betrachtet. Über die stochastische Auswertung hat die Reihenfolge jedoch keinen Einfluss auf das Ergebnis. Einzig die Parameter „Schaltzeiten der LSA“ und „Beschleunigung der Fahrzeuge“ werden im Rahmen dieser Untersuchung diskret variiert. Ferner werden die Auswirkungen auf das Verhalten der Fahrzeuge in der Simulation und die Ergebnisse analysiert.

### **3.3.1 Schaltzeiten der LSA**

Mit einer variablen Schaltzeit der LSA können unterschiedlich große Kreuzungen betrachtet werden. So sind die LSA einer vielbefahrenen, innerstädtischen Kreuzung deutlich länger auf grün (und entsprechend auch rot) geschaltet als die LSA einer kleinen Kreuzung. Mit der Variation der Schaltzeiten lässt sich eine Aussage bezüglich des Einflusses auf wichtige Parameter der Simulation treffen. Daher wird auf Grundlage der „Richtlinien für Lichtsignalanlagen“ (vgl. [FGSV10]) eine Grünphasendauer zwischen 5 und 90 Sekunden betrachtet. Die Rotphasendauer wird den Richtlinien entsprechend mit der doppelten Dauer angenommen.

Eine Grünphasendauer der LSA unter 15 Sekunden hat sich für die Simulation jedoch nicht für sinnvoll erwiesen. Da nur eine kleine Anzahl von Fahrzeugen die LSA während der Freigabezeit passieren konnte und die Unterschiede zwischen den Szenarios nicht gut

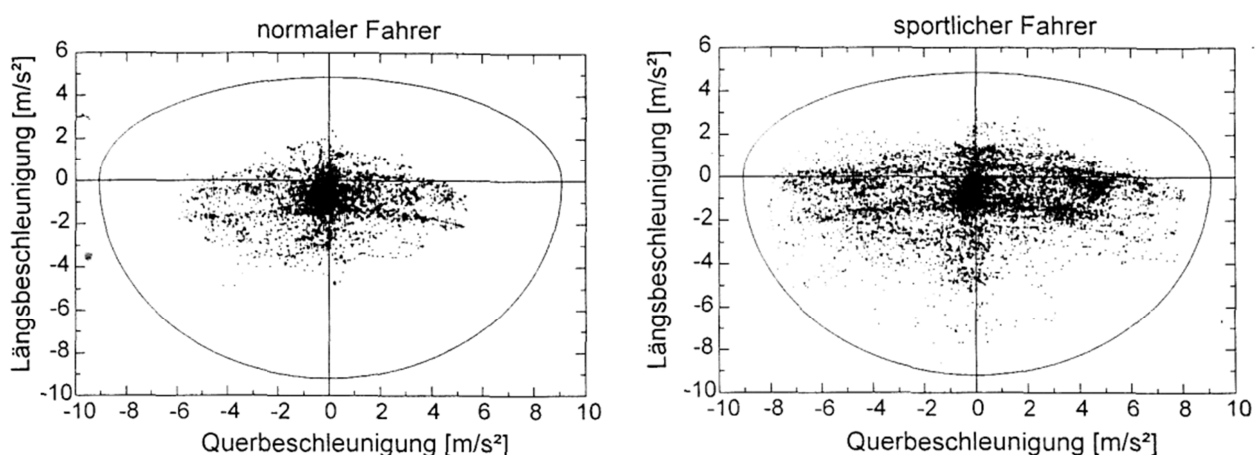
abgebildet wurden. Daher werden die Grünphasendauern, von 15 Sekunden ausgehend, in 15 Sekunden Schritten bis auf 90 Sekunden simuliert. Es ergeben sich sechs unterschiedliche Zeiten.

Schaltzeiten der LSA:

- 15 s (30 s Rotphase)
- 30 s (60 s Rotphase)
- 45 s (90 s Rotphase)
- 60 s (120 s Rotphase)
- 75 s (150 s Rotphase)
- 90 s (180 s Rotphase),

### 3.3.2 Beschleunigungen

Die Variation der Beschleunigungswerte soll zeigen, inwiefern sie sich auf Parameter der Simulation (wie beispielsweise den Durchsatz) auswirken. Dabei stellt sich die Frage, ob gleichzeitig negative Effekte (zum Beispiel ein starker Anstieg des Kraftstoffverbrauchs) einsetzen und sich somit eine optimale Betriebsstrategie abzeichnet. Die für die Simulation verwendeten Beschleunigungswerte lassen sich anhand von Abbildung 3-7 ableiten.



**Abbildung 3-7: Längsbeschleunigungen von normalen (links) und sportlichen (rechts) Fahrern [NIC01]**



Die Beschleunigungswerte in Längsrichtung liegen sowohl beim normalen als auch beim sportlichen Fahrer in einem Bereich von  $0 \frac{m}{s^2}$  bis  $2 \frac{m}{s^2}$ . Da zu kleine Beschleunigungswerte zu sehr langen Anfahrvorgängen führen, beginnt die Variation des Beschleunigungswertes mit  $1 \frac{m}{s^2}$ . Sie werden in  $0,5 \frac{m}{s^2}$  Schritten auf  $2 \frac{m}{s^2}$  erhöht.

Dementsprechend ergeben sich die folgenden drei Beschleunigungswerte:

- $a = 1 \frac{m}{s^2}$
- $a = 1,5 \frac{m}{s^2}$
- $a = 2 \frac{m}{s^2}$

### 3.4 Start- und Abbruchbedingungen

Damit die unterschiedlichen Simulationsszenarien untereinander vergleichbar und reproduzierbar sind, werden gewisse Start- und Abbruchbedingungen festgelegt. Das Szenario wird gestartet, wenn das letzte der 50 Fahrzeuge im Rückstau vor der LSA zum Stehen kommt. Die Simulation wird beendet, wenn das letzte der 50 Fahrzeuge die Kreuzung während der Freigabezeit der LSA überquert hat.

#### Startbedingung:

- Das letzte der 50 Fahrzeuge hat die Geschwindigkeit  $0 \frac{m}{s}$

#### Abbruchbedingungen:

- Das letzte der 50 Fahrzeuge hat die Kreuzung während der Freigabezeit überquert

Jede Simulation läuft somit von einem gleichen Anfangspunkt bis zu einem definierten Endpunkt. Die dabei aufgezeichneten Parameter können direkt miteinander verglichen werden. So variieren die Simulationszeiten, die Kraftstoffverbräuche und die Partikelemissionen bei unterschiedlichen Simulationsszenarien. Da in dieser Arbeit die effizienteste Möglichkeit gesucht wird, einen an einer LSA vorhandenen Stau abzubauen, sind diese Rahmenbedingungen zielführend.

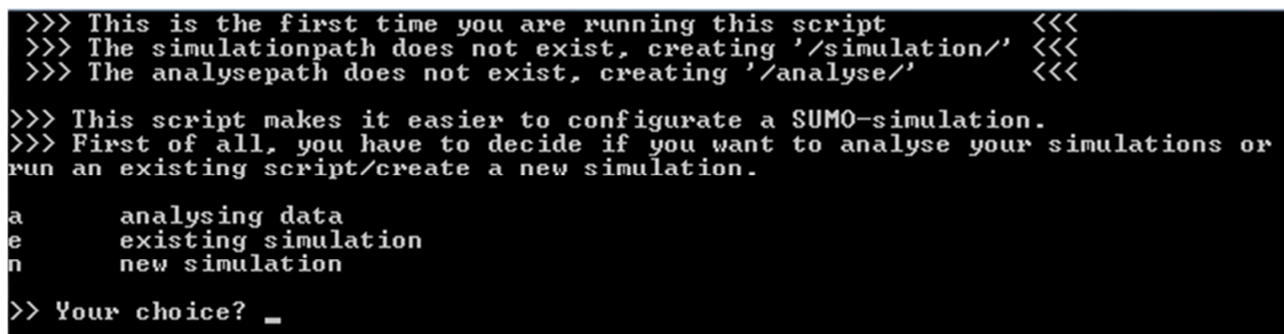
Als Grundeinheit der Simulation dienen die „Steps“. Sie sind nichts anderes als die laufende Zeit der Simulation. In dieser Simulation wurde ein Step genau einer Sekunde zugewiesen. Diese Tatsache erleichtert den Umgang mit den Einheiten erheblich, da beispielsweise die Beschleunigung nur mit dem Zeitfaktor eins multipliziert werden muss um die Geschwindigkeit zu erhalten.

## 3.5 Skripte zum Betreiben der Simulation

Die Simulation der unterschiedlichen Szenarien erzeugt eine Vielzahl von Dateien. Damit der Überblick über die Simulationsdateien nicht verloren geht, wurde ein Skript zur Organisation der Daten erstellt. Die geschriebene „sumo\_manager.py“-Datei (Sumo Manager) übernimmt dabei nach dem Starten jegliche Steuerung der einzelnen Komponenten. Die Hauptdatei wird dabei durch Unterskripte (Subskripte) und deren Funktionen erweitert. Nachstehend werden die einzelnen Skripte vorgestellt, kurz beschrieben und deren Benutzung erklärt.

### 3.5.1 Sumo Manager

In Abbildung 3-8 ist die Konsole des Sumo Manager beim ersten Start dargestellt. Falls nicht vorhanden, werden die Unterordner „simulation“ und „analyse“ automatisch erzeugt. Diese Ordner sind von höchster Wichtigkeit, da in ihnen die Simulations- und Analysedateien gespeichert werden.



```
>>> This is the first time you are running this script <<<
>>> The simulationpath does not exist, creating '/simulation/' <<<
>>> The analysepath does not exist, creating '/analyse/' <<<

>>> This script makes it easier to configurate a SUMO-simulation.
>>> First of all, you have to decide if you want to analyse your simulations or
run an existing script/create a new simulation.

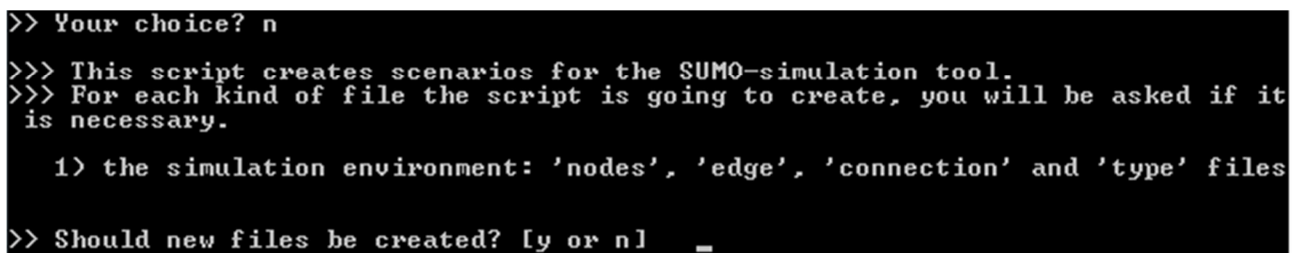
a      analysing data
e      existing simulation
n      new simulation

>> Your choice? _
```

Abbildung 3-8: Der Sumo Manager beim ersten Start

Nun stehen dem Benutzer die Optionen „a - analysing data“, „e – existing simulation“ und „n – new simulation“ zur Auswahl. Mit der Eingabe „a“ gelangt man in das Subskript „analyse.py“, welches nachfolgend erläutert wird und zur Auswertung bereits durchgeführter Simulationen dient (vgl. 3.5.2). Die Option „e – existing simulation“ erlaubt es dem Benutzer, eine bereits erstellte Simulationen ganz oder in Teilen ausführen zu lassen. So können bereits vorhandene Simulationsergebnisse nachgeprüft oder fehlende Simulationen nachgeholt werden. Mit der dritten Eingabemöglichkeit „n“ können neue Simulationen erzeugt und anschließend ausgeführt werden.

Wenn das Programm zum ersten Mal gestartet wird und keine Simulationsdateien vorliegen, müssen diese also erzeugt werden. Dementsprechend führt die Eingabe „n“ den Benutzer zur nachstehenden Bildschirmausgabe.

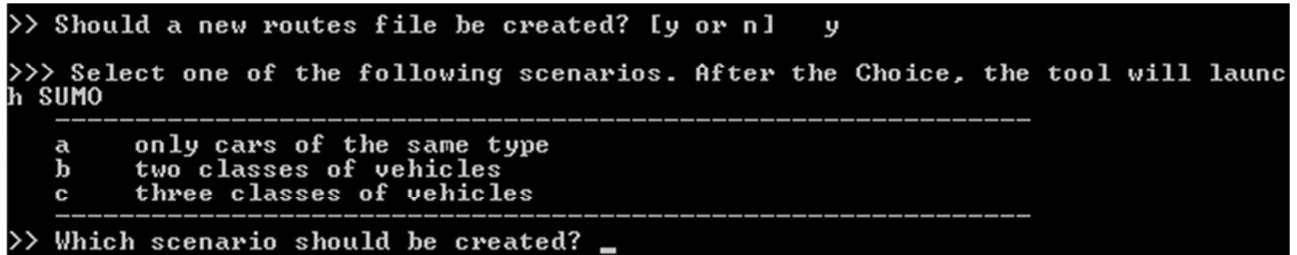


```
>>> Your choice? n
>>> This script creates scenarios for the SUMO-simulation tool.
>>> For each kind of file the script is going to create, you will be asked if it
    is necessary.
    1) the simulation environment: 'nodes', 'edge', 'connection' and 'type' files
>> Should new files be created? [y or n] _
```

**Abbildung 3-9: Erzeugung eines neuen Simulationsaufbaus**

Mit der Eingabe „y“ wird der Simulationsaufbau erzeugt. Dieser umfasst die nodes-, edges-, connection- und type-Dateien, die für die korrekte Ausführung der Simulationen essentiell sind. Anschließend muss ein Name für die Simulation vergeben werden. Dieser kann grundsätzlich aus allen Buchstaben, nicht aber aus Sonderzeichen bestehen. Das Skript erzeugt automatisch jeweils einen Ordner im Simulations- und Analyseordner. Weiterhin werden Unterordner erstellt, die die unterschiedlichen Dateien zur Untersuchung des Einflusses der verschiedenen Anfahrstrategien (vgl. 3.2) und Variationsparameter (vgl. 3.3) beinhalten.

Mit der nächsten Eingabe muss der Benutzer entscheiden, ob neue Fahrzeugklassen erzeugt werden sollen. Wenn sich für die Eingabe „y“ entschieden wurde, erscheint die in Abbildung 3-10 gezeigte Übersicht.



```
>> Should a new routes file be created? [y or n]  y
>>> Select one of the following scenarios. After the Choice, the tool will launch SUMO
-----
a    only cars of the same type
b    two classes of vehicles
c    three classes of vehicles
-----
>> Which scenario should be created?  a
```

**Abbildung 3-10: Erzeugung der Fahrzeugklassen für die Simulationen**

Mithilfe des Sumo Managers können unterschiedliche Fahrzeugklassen zur Simulation in Form von routes-Dateien hinzugefügt werden (vgl. 3.1). Ferner lassen sich mit diesem unterschiedliche und zufällige Verkehrsaufkommen generieren. Mit jeder erzeugten Simulationsdatei werden pro Variationsparameter (siehe Abschnitt 3.3) 200 Simulationen erzeugt. Mit dieser Anzahl von Simulationen kann das Ergebnis ausreichend statistisch validiert abgebildet werden. Bei der Wahl der Fahrzeugklassen stehen nun drei Klassen zu Verfügung. Bei einer Fahrzeugklasse werden lediglich Fahrzeuge der Golfklasse erzeugt. Wenn zwei Fahrzeugklassen generiert werden, dann besteht die Simulation jeweils zur Hälfte aus Fahrzeugen der Fox- und der Passatklasse. Bei der Erzeugung von drei Fahrzeugklassen besteht die Kolonne der Fahrzeuge zu je einem Drittel aus Fahrzeugen der Golf-, Fox- und Passatklasse.

Nach der Auswahl des Verkehrsaufkommens wird der Benutzer aufgefordert, eine Simulation auszuwählen. Nachdem diese Auswahl getroffen wurde, startet die Simulation unter SUMO von selbst. Die Kontrolle der Fahrzeuge und der LSA obliegt weiterhin dem Sumo Manager. Lediglich der Grad der Kontrolle variiert je nach dem ausgeführten Anfahrverhalten. Der Sumo Manager durchläuft dabei automatisch alle Szenarien und alle Variationsparameter in der gewünschten Anzahl von Simulationen.

### 3.5.2 Subskripte

In dem zuvor beschriebenen Sumo Manager werden eine Vielzahl von Funktionen definiert und aufgerufen, die für den Ablauf der Simulation essentiell sind. Funktionen, die sich mit der Erzeugung des Simulationsaufbaus beschäftigen oder wichtige Simulationsparameter beinhalten, sind in Subskripten wiederzufinden. Die Funktion, die die Berechnung des Mittelwerts übernimmt, befindet sich ebenfalls in einem anderen Skript.

#### Environment:

In der Environment-Datei (environment.py) befinden sich alle Funktionen, die sich mit der Erzeugung der Simulationsdateien befassen. Hier werden die angesprochenen nodes, edges, connection und type-files erzeugt und anschließend automatisch kompiliert. Des Weiteren wird auf Basis der Eingabe des Benutzers ein routes-file erzeugt, das mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeitsfunktionen die Art der Fahrzeuge (maximal drei Fahrzeugklassen vgl. Tabelle 3-1) bestimmt.

Abschließend wird in der Environment-Datei mit der \*.sumo.cfg-Datei die endgültige Konfigurationsdatei zum Starten von SUMO erzeugt. Die Environment-Datei erzeugt die Dateien pro Variationsparameter 200 Mal. Insgesamt werden also 3600 routes- und 3600 \*.sumo.cfg-Dateien (200 Simulationen \* 3 Beschleunigungen \* 6 unterschiedliche Grünphasenlängen der LSA) erzeugt.

#### Settings:

Die wichtigsten Parameter, auf der die Simulation beruht, werden in der Settings-Datei (settings.py) gespeichert. So werden in dieser Datei die maximale Anzahl von Fahrzeugen, die Anzahl der Simulationszyklen und die Höchstgeschwindigkeit festgelegt. Sinn der Datei ist die Möglichkeit der schnellen Variation der Simulation ohne Kenntnis des Quellcodes.

Wichtig ist, dass die Simulation bei Veränderung dieser Werte nur noch mit Simulationsdateien derselben Parameter funktioniert. Wurden Simulationsdateien mit beispielsweise 55 Fahrzeugen und 125 Simulationszyklen erzeugt und sollen nun simuliert werden, so müssen diese Zahlen mit denen in der Settings-Datei übereinstimmen.

### Analyse:

In der Analysedatei (analyse.py) werden die Mittelwerte zu den aufgezeichneten Simulationsergebnissen (z.B. Kraftstoffverbrauch, CO<sub>2</sub>-Ausstoß und Zeit der Simulation) berechnet. Diese werden anschließend in eine \*.csv-Datei geschrieben und können somit mit einem entsprechenden Datenauswertewerkzeug aufgelistet und grafisch aufgearbeitet werden.

Dabei berechnet sich der Mittelwert wie folgt

$$\bar{x} = \frac{1}{n} * \sum_{i=0}^n x_i \quad (1)$$

## 3.6 Programmierung

Um den Einfluss unterschiedlicher Anfahrstrategien abschätzen zu können, werden die drei bereits erläuterten Anfahrscenarien untersucht. Im folgenden Abschnitt wird Umsetzung des Anfahrverhaltens in der Programmierung genauer beschrieben.

### 3.6.1 Das verzögerte Anfahren - „Normal behaviour“

Die erste Herausforderung bei der Umsetzung dieses Szenarios bestand darin, dass SUMO ein verzögertes Anfahren nicht vorsieht. Das in SUMO implementierte Anfahrverhalten beruht lediglich auf dem genügend großen Sicherheitsabstand zwischen den Fahrzeugen. Dementsprechend musste eine Funktion geschrieben werden, die dieses Feature ermöglicht.

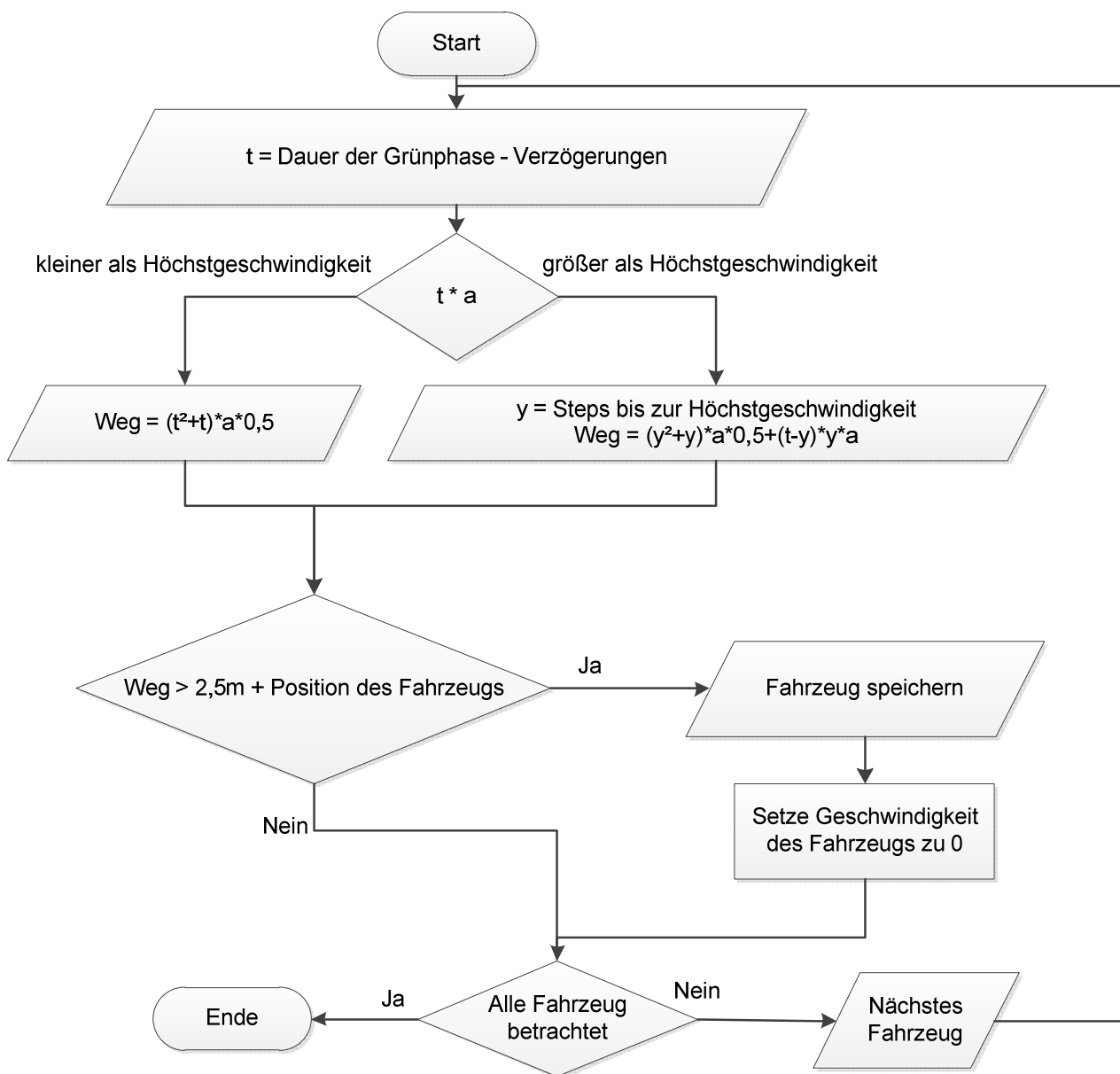
	<pre># random delay for the cars at the traffic light. Between 1 and 3 seconds</pre>
1	<pre>randomdel = randint(1,3)</pre>
2	<pre>randomdelay = str(randomdel)</pre>
3	<pre>[...]</pre>
4	<pre>print &gt;&gt; routes, ('    &lt;vehicle id="' + str(idcars) + '" type="' + cartype + '" route="lr" color="' + color + '" depart="' + str(depart) + '" departspeed="0.2" randomdelay="' + randomdelay + '" /&gt;')</pre>

**Abbildung 3-11: Auszug aus dem Quelltext der „environment.py“**

Die erstellte Funktion erzeugt eine ganzzahlige Zufallsgröße zwischen 1 und 3 (siehe Abbildung 3-11: Zeile 1 & 2), die für die Verzögerung (engl. delay) in Sekunden steht. Damit zur nachträglichen Wiederholung von bestimmten Simulationen die Verzögerungen immer den gleichen Fahrzeugen zugewiesen werden kann, müssen die Verzögerungen unverwechselbar mit den Fahrzeugen verknüpft werden. Diese Verknüpfung ist nur dann gegeben, wenn die Verzögerungen direkt in der Definition der Fahrzeuge auftauchen. Ferner wird mittels der Environment-Datei bei der Erstellung eines routes-files in jede Definitionszeile der Fahrzeuge die Zeit hinzugefügt (siehe Abbildung 3-11: Zeile 4). Nun ist es möglich, den Fahrzeugen die Verzögerung eindeutig zuzuordnen. Auch Beim Ablauf der Simulation spielen sie eine bedeutende Rolle, denn je mehr Fahrzeuge vor einem betrachteten Fahrzeug stehen, desto größer wird die Verzögerung. Hinzu kommt, dass die Verzögerung den Fahrzeugen zufällig zugeordnet wird um ein möglichst realistische Bedingungen simulieren zu können.

Der zweite Teil des Anfahrverhaltens besteht in der Steuerung der Fahrzeuge. Sie teilt sich wiederum in zwei Untergruppen. Zum einen muss errechnet werden, welche Fahrzeuge die LSA in der Freigabezeit passieren können und zum anderen müssen diese Fahrzeuge anschließend mit der richtigen Geschwindigkeit gesteuert werden.

Die Detektion der Fahrzeuge, die die LSA während der Grünphase passieren können, übernimmt dabei eine Funktion, die nur ausgeführt wird, wenn die Position aller Fahrzeuge erfasst ist und die LSA im nächsten Step auf grün umspringt. Sind die Positionen aller Fahrzeuge hinsichtlich des Überquerens der Kreuzung während der Freigabezeit ausgewertet, wird die Funktion bis zur Schaltung zur nächsten Grünphase nicht aufgerufen. Die Funktion ist im nachstehenden Flussdiagramm dargestellt. Mit der Funktion wird errechnet, welche der Fahrzeuge es aufgrund der Entfernung, der möglichen Beschleunigung, der Verzögerung der vorstehenden Fahrzeuge und der Maximalgeschwindigkeit schaffen, die LSA während der Freigabezeit zu passieren.



**Abbildung 3-12: Das Flussdiagramm der Funktion zum Ermitteln der über die LSA gelangenden Fahrzeuge**

Dafür wird in der Variable  $t$  die Zeit festgehalten, die dem Fahrzeug zum Überqueren der LSA zur Verfügung steht. Die Zeit  $t$  hängt somit direkt mit den Verzögerungen der Fahrzeuge vor dem betrachteten Fahrzeug zusammen. Im Anschluss muss ermittelt werden, ob das Fahrzeug in dieser Zeit  $t$  bei konstanter Beschleunigung die Maximalgeschwindigkeit von  $50 \frac{\text{km}}{\text{h}} \approx 13 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  nicht überschreitet. Ist dies nicht der Fall, so wird der zurückgelegte Weg nach Formel (2) berechnet.

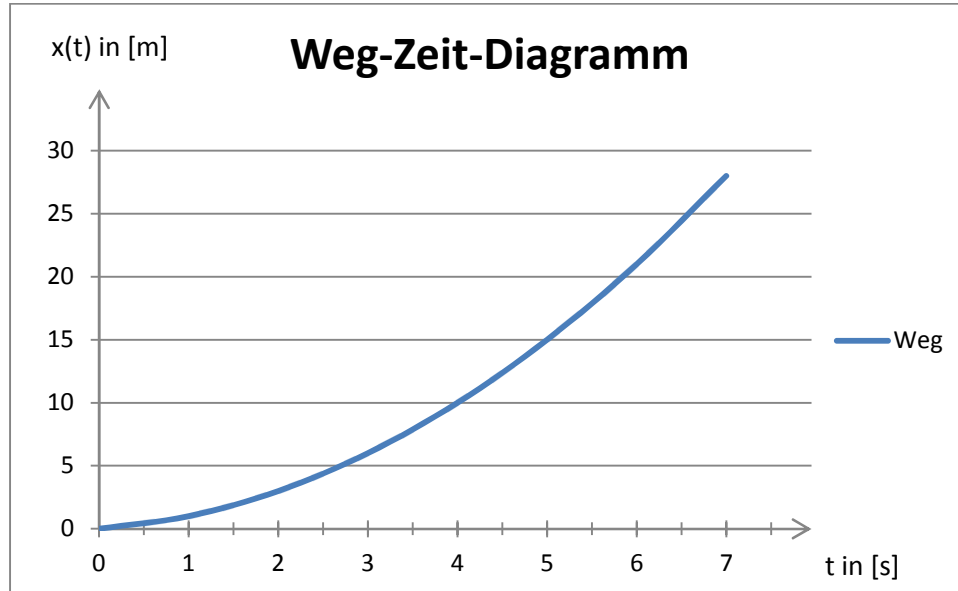


$$x(t) = \frac{t^2 + t}{2} * a \quad (2)$$

Dieser mathematische Zusammenhang ergibt sich aus der folgenden Überlegung.

Ein Fahrzeug steht direkt vor der LSA, die auf grün umspringt. Es hat zunächst die Geschwindigkeit null und den Weg null zurückgelegt. Zur Messung im ersten Step wird es, entsprechend seiner Beschleunigung, an Geschwindigkeit zulegen und Weg zurücklegen. Gleiches ist bei den anschließenden Steps der Fall. Demnach ergibt sich mit einer Beschleunigung von  $1 \frac{m}{s^2}$  das in Abbildung 3-13 gezeigte Weg-Zeit-Verhalten. Diese Vorschrift ermittelte sich aus den Werten, die durch die Simulation ausgegeben werden konnten.

Mit der Vorschrift ist es ferner möglich, den maximal zurücklegbaren Weg in Abhängigkeit zur Verfügung stehenden Zeit zu ermitteln.



**Abbildung 3-13: Weg-Zeit-Verhalten ( $a = 1 \frac{m}{s^2}$ )**

Würde hingegen die Maximalgeschwindigkeit vom Fahrzeug überschritten werden, so muss der Weg nach Formel (3) ausgerechnet werden.

$$x(t) = \frac{y^2 + y}{2} * a + (t - y) * y * a \quad (3)$$

Hierbei steht die Variable  $y$  für die Anzahl der Steps, in denen das Fahrzeug mit der konstanten Beschleunigung die Maximalgeschwindigkeit gerade nicht überschreitet. Die anderen Steps kann das Fahrzeug dann lediglich mit dieser konstanten Geschwindigkeit zurücklegen, da ein weiteres Beschleunigen zu einer Überschreitung der Maximalgeschwindigkeit führen würde. Ein Beispiel zu diesem Fall ist in Abbildung 3-14 gezeigt. Die Beschleunigung beträgt hierbei  $2 \text{ m/s}^2$ .

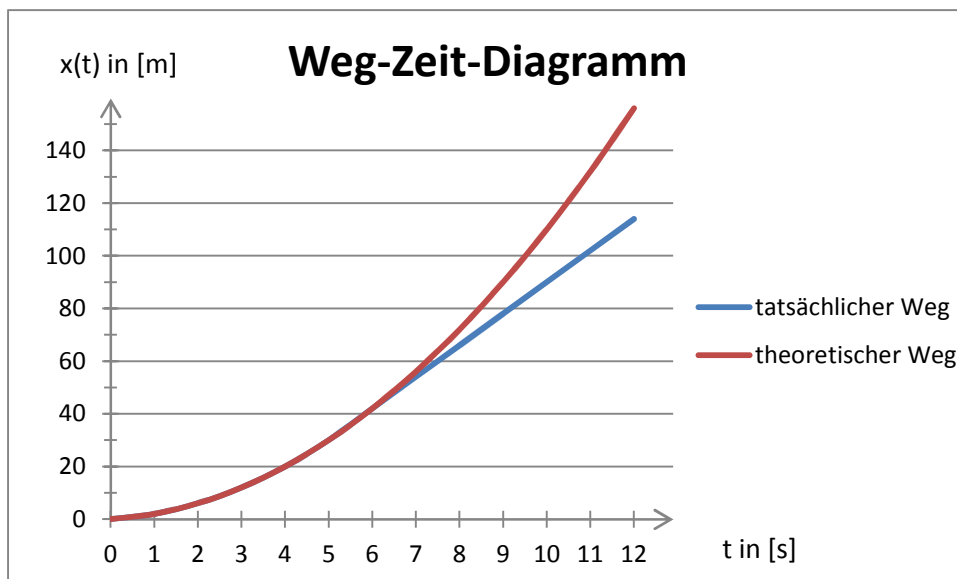
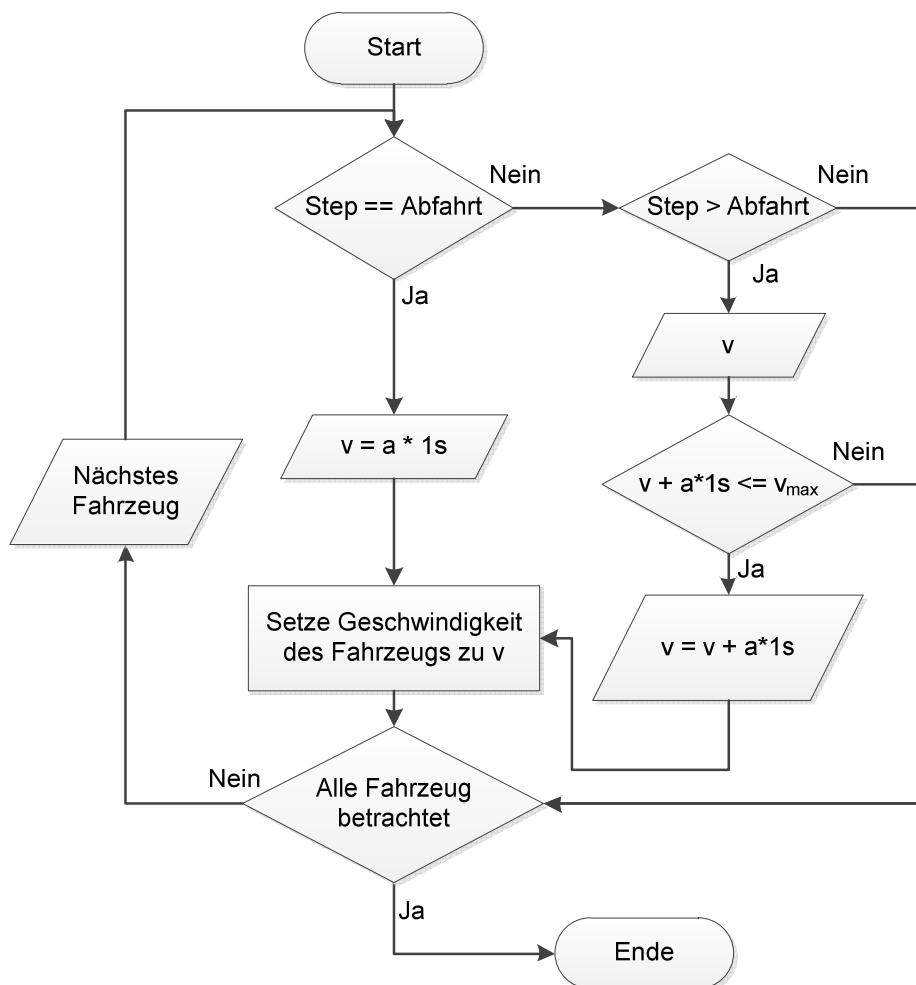


Abbildung 3-14: Weg-Zeit-Verhalten ( $a = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ )

Der Graph in Abbildung 3-14 zeigt zunächst dasselbe Verhalten wie der Graph in Abbildung 3-13. Ab dem siebten Step würde die Höchstgeschwindigkeit von  $13 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  überschritten werden. Daher bewegt sich das Fahrzeug ab diesem Step nur noch gleichförmig. Der zurücklegbare Weg ist daher kleiner als wenn es weiter beschleunigen könnte. Diese Tatsache wird durch die Überprüfung der Geschwindigkeit im Flussdiagramm in Abbildung 3-12 sichergestellt.

Wenn die errechnete, praktisch zurücklegbare Entfernung größer als die Entfernung des Fahrzeugs von der LSA plus den Sicherheitsabstand von 2,5 m ist, dann wird das Fahrzeug die Überquerung schaffen. Ist dies der Fall, so wird gespeichert, welches Fahrzeug die Kreuzung während der Freigabe überqueren kann und wann es losfährt. Zusätzlich wird die Geschwindigkeit des ermittelten Fahrzeugs auf  $0 \frac{m}{s}$  gesetzt, damit es nicht vor der in der routes-Datei vorgeschriebenen Verzögerung anfährt. Die Funktion wird beendet, wenn alle Fahrzeuge betrachtet wurden.

Danach müssen die Fahrzeuge, die die Kreuzung während der Freigabezeit der LSA überqueren, von einer anderen Funktion gesteuert werden. Die Funktion wird erst aufgerufen, wenn alle Fahrzeuge erfasst wurden. Das Flussdiagramm der Funktion ist nachstehend dargestellt.



**Abbildung 3-15: Das Flussdiagramm der Funktion zum Steuern der Fahrzeuge**

Für jedes Fahrzeug wird geprüft, ob die Abfahrtszeit erreicht ist. Ist dies der Fall, dann wird die Geschwindigkeit des Fahrzeugs auf  $v = a * 1\text{ s}$  gesetzt. Ist die aktuelle Zeit der Simulation größer als die Abfahrtszeit, wird die Geschwindigkeit des betreffenden Fahrzeugs ermittelt. Sofern die neue Geschwindigkeit (ergibt sich aus Summe der Beschleunigung (multipliziert mit 1 Step) und der Geschwindigkeit des Fahrzeugs) kleiner als die Maximalgeschwindigkeit ist, kann das betrachtete Fahrzeug ebendiese neue Geschwindigkeit annehmen. Andernfalls behält es die alte Geschwindigkeit und bewegt sich von diesem Step an gleichförmig. Die Funktion wird erst mit dem Ende der Simulation beendet.

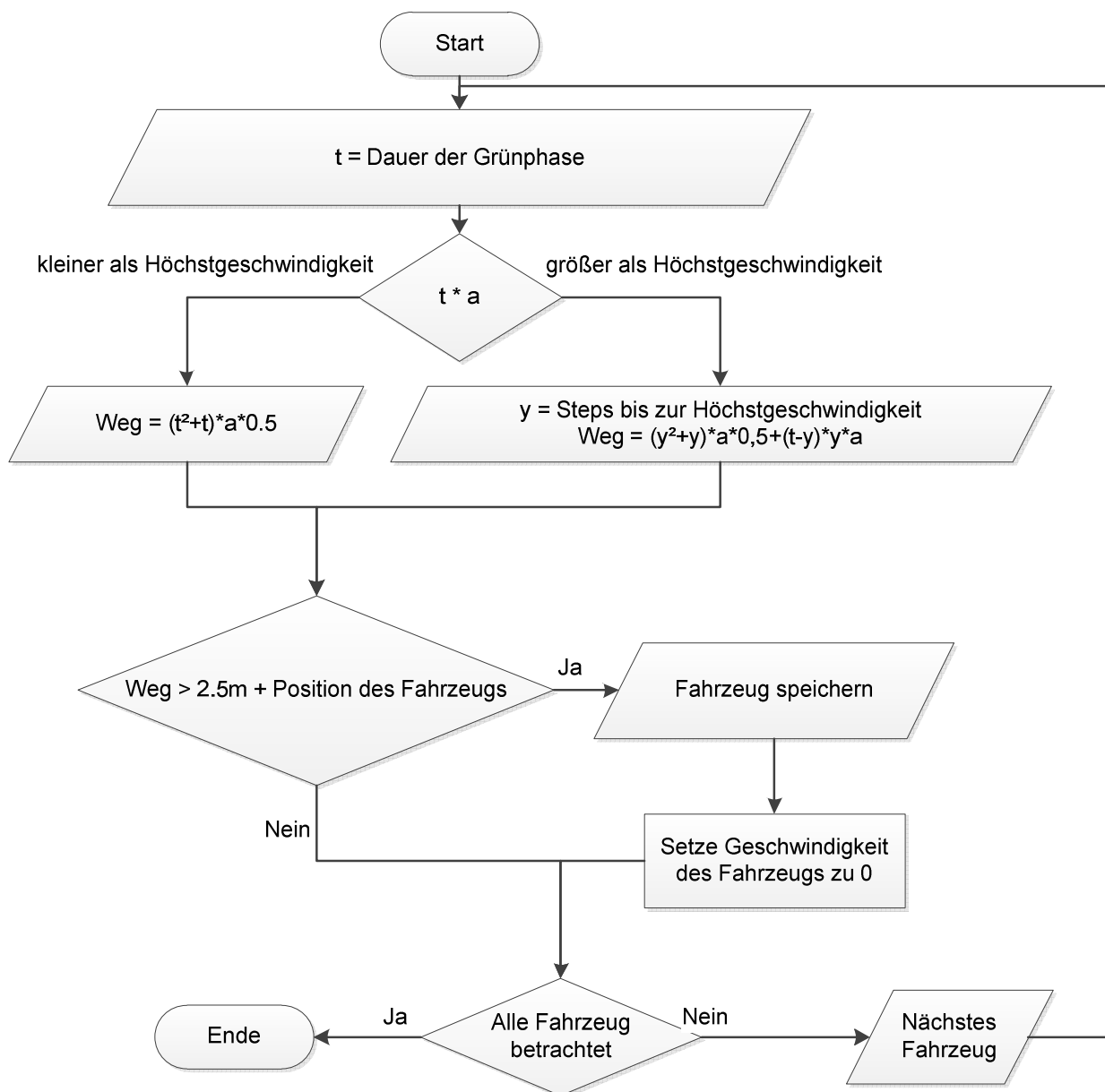
### **3.6.2 Das Anfahren mit LSA Assistenten - „Traffic light assistant“**

Die Umsetzung des Anfahrens mit LSA Assistenten erfolgt auf Basis des bereits in SUMO implementierten Anfahrverhaltens. Es berechnet den Anfahrzeitpunkt ausschließlich über die Einhaltung des Sicherheitsabstandes. Weitere Einflüsse wie beispielsweise Verspätungen beim Anfahren, zu große Zwischenräume beim Anbremsvorgang an die LSA oder zu langsames Anfahren werden nicht berücksichtigt.

### **3.6.3 Das Anfahren in einer Fahrzeugkolonne - „driving in Platoons“**

Das dritte Szenario befasst sich mit dem Anfahrvorgang in einer Fahrzeugkolonne. Dafür muss ermittelt werden, welche Fahrzeuge die Überquerung der LSA in einer Kolonne schaffen. Der programmiertechnische Hintergrund lehnt sich an den des ersten Szenarios an. Zwei Untergruppen übernehmen jeweils einen Teil der Steuerung. Die erste Untergruppe beschäftigt sich hierbei mit der Erfassung der zur Fahrzeugkolonne gehörenden Fahrzeuge und die zweite Untergruppe steuert die jeweiligen Fahrzeuge.

In Abbildung 3-16 ist das Flussdiagramm der Funktion zum Ermitteln der Fahrzeuge gezeigt.

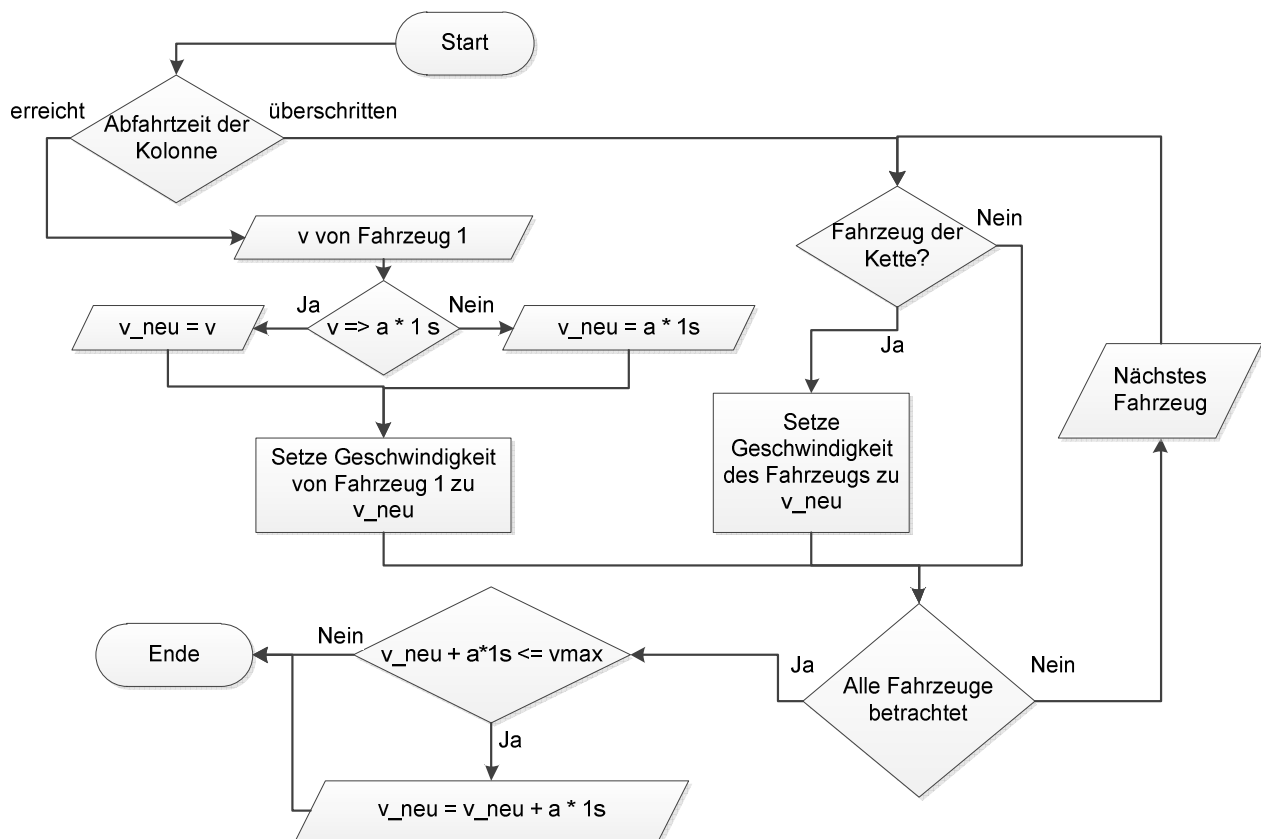


**Abbildung 3-16: Der Ablaufplan der Funktion zum Ermitteln der Fahrzeugkolonne**

Die Funktion läuft analog zur in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen Funktion ab. Sie wird nur ausgeführt, wenn die Position aller Fahrzeuge erfasst ist und die LSA im nächsten Step auf grün umspringt. Anschließend wird die Dauer der Grünphase auf die Variable t geschrieben. Der Vergleich des Produktes aus der konstanten Beschleunigung und der Zeit mit der Maximalgeschwindigkeit soll verhindern, dass das Fahrzeug die Maximalgeschwindigkeit überschreitet. Der „Weg“ berechnet sich je nach erreichter Geschwindigkeit mit der jeweiligen Formel. Ist die Entfernung zwischen Fahrzeug (inklusive des Sicher-

heitsabstandes) und der LSA kleiner als der „Weg“, so kann es die Kreuzung überqueren. Wenn alle Fahrzeuge betrachtet wurden, wird die Funktion beendet.

Die Steuerung und Kontrolle der in der Kolonne fahrenden Fahrzeuge wird von der in Abbildung 3-17 gezeigten Funktion übernommen. Die Funktion wird für jeden Step erneut aufgerufen und ausgeführt, wenn die Abfahrtszeit der Kolonne einmalig erreicht wurde. Dies wird so lange wiederholt, bis alle Fahrzeuge der Kolonne die Simulation verlassen haben.



**Abbildung 3-17: Flussdiagramm zur Steuerung der Fahrzeuge in der Kolonne**

Zunächst muss ermittelt werden, ob das erste Fahrzeug der Kolonne bereits eine Geschwindigkeit aufweist. Diese Abfrage verhindert ein Auffahren der nachfolgenden Fahrzeuge. Ist die Geschwindigkeit zur Startzeit kleiner als  $1\text{ Step} \cdot \text{Beschleunigung}$ , so wird dieser Wert als neue Geschwindigkeit gesetzt. Andersfalls bleibt die Geschwindigkeit des

ersten Fahrzeugs erhalten. Nun werden die Geschwindigkeiten aller weiteren Fahrzeuge, die außer dem ersten Fahrzeug die Kreuzung überqueren werden, auf dieselbe Geschwindigkeit gesetzt. Nachdem alle Fahrzeuge betrachtet wurden, wird überprüft, ob die Geschwindigkeit für den nächsten Durchlauf erhöht werden kann, ohne, dass die Maximalgeschwindigkeit überschritten wird. Die Funktion beendet die Steuerung der Fahrzeuge erst, wenn alle Fahrzeuge die Simulation verlassen haben.

### **3.7 Ablauf der Simulation**

Alle Simulationen laufen nach den zuvor beschriebenen Rahmenbedingungen ab. Es gibt jeweils eine Start- und eine Abbruchbedingung (vgl. 3.4), die in allen Simulationen gleich sind. So wird die Simulation gestartet, wenn sich alle Fahrzeuge auf der Straße vor der LSA befinden und das letzte Fahrzeug keine Geschwindigkeit mehr aufweist. Nachdem die LSA von rot auf rot-gelb geschaltet hat, springt sie auf grün und die Fahrzeuge fahren los. Je nachdem, welches der unter Abschnitt 3.2 vorgestellten Szenarien untersucht wird und welche Parametervariation simuliert wird (vgl. Abschnitt 3.3), variiert das Anfahrverhalten der Fahrzeuge.

Während der Simulation werden pro Szenario zwei Dateien erzeugt. In der einen (head-file) werden Grundparameter der Simulation festgehalten. Unter anderem lässt sich mit der Datei ermitteln wie viele und welche Fahrzeuge pro Grünphase über die Kreuzung gefahren sind und zu welchen Steps die LSA umgeschaltet hat. Des Weiteren werden im head-file alle Kennwerte der Fahrzeuge festgehalten. In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Parameter des head-files aufgelistet.

Parameter	Beschreibung	Einheit
Total time of simulation	zwischen Start- und Abbruchbedingung vergangene Zeit	[s]
Number of green phases	Anzahl der bis zum Abbau des Rückstaus vergangen Grünphasen	[ ]
Speed	Durchschnittsgeschwindigkeit aller Fahrzeuge	[m/s]
CO2 emission	Summe der CO2 Emissionen aller Fahrzeuge	[g]
CO emission	Summe der CO Emissionen aller Fahrzeuge	[g]
HC emission	Summe der HC Emissionen aller Fahrzeuge	[g]
PMx emission	Summe der PMx Emissionen aller Fahrzeuge	[g]
NOx emission	Summe der NOx Emissionen aller Fahrzeuge	[g]
Fuel consumption	Summe der Verbräuche aller Fahrzeuge	[l]

**Tabelle 3-2: Auflistung der wichtigsten Kenngrößen der Simulation**

Die aufgelisteten Werte werden durch das Interface „TraCI“ (Traffic Control Interface) ermittelt. Dieses berechnet die Werte eines bestimmten Fahrzeuges auf Grundlage der HBEFA Richtlinien. HBEFA steht für das englische „Handbook Emission Factors for Road Transport“ und beinhaltet Emissions- und Kraftstoffverbrauchskennwerte für alle gängigen Fahrzeugklassen. Als Emissionsklasse wurde die PKW-Klasse „passenger“ verwendet. Weiterführende Informationen und Hintergründe sind in den entsprechenden Dokumenten zu erfahren (vgl. [UWB11] und [OEAV]).

Neben der head-Datei wird beim Durchlaufen einer jeder Simulation eine vehicle-Datei angelegt, die zu jedem Step und Fahrzeug die jeweiligen Parameter festhält. In diesem „vehicle“-file kann dementsprechend nachvollzogen werden, welche Geschwindigkeit welches Fahrzeug zu welchem Step hatte, wo es sich befand und wie seine Kraftstoffverbrauchswerte zu diesem Step waren.

Mithilfe dieser beiden Dateien ist eine nachträgliche Auswertung durch das Analyseskript in Zusammenarbeit mit einer Software zur grafischen Aufarbeitung möglich.



## 4 Auswertung

In diesem Kapitel erfolgt die Auswertung der Simulationsergebnisse. Diese beruhen auf jeweils 200 Simulationen pro Szenario und Grünphasendauer bzw. Beschleunigung. Ferner wurde für jedes der drei Szenarien mit einer der sechs Grünphasendauern und einem der drei Beschleunigungswerte der Mittelwert der 200 Simulationen mithilfe des Analyseskriptes (analyse.py) berechnet. Dementsprechend basiert die Auswertung eines untersuchten Parameters auf 3600 Werten pro Anfahrstrategie.

Zunächst werden die Auswertungen der unterschiedlichen Simulationszeiten (also die Aufenthaltsdauer des letzten Fahrzeugs in der Simulation) sowie die Anzahl der Grünphasen der drei Szenarien vorgestellt und miteinander verglichen. Anschließend zeigt eine Auswertung des Kraftstoffverbrauchs den Unterschied der Szenarien auf. Schließlich werden auf den Auswertungen basierende Strategien entwickelt und diskutiert.

### 4.1 Simulationszeiten

Die Simulationszeiten beschreiben die Dauer der Simulation vom erstmaligen Umschalten der LSA auf grün bis zu dem Zeitpunkt, an dem das letzte Fahrzeug die LSA während der Freigabezeit passiert hat. Dabei wird ebenso festgehalten, wie viele Grünphasen zum Räumen der Kreuzung erforderlich waren.

#### Das verzögerte Anfahren:

In Abbildung 4-1 oben ist der Verlauf der Simulationszeit über der Grünphasendauer aufgetragen. Die drei Graphen beschreiben die unterschiedlichen Beschleunigungen. Es ist zu erkennen, dass alle Graphen bis zur Grünphasendauer von 75 s monoton fallend sind. Bei der Grünphasendauer von 75 s bildet sich ein Minimum aus, danach steigt die Simulationszeit wieder an. Hinsichtlich der unterschiedlichen Beschleunigungen kann festgehalten werden, dass die Simulationszeit mit einer steigenden Beschleunigung abnimmt.

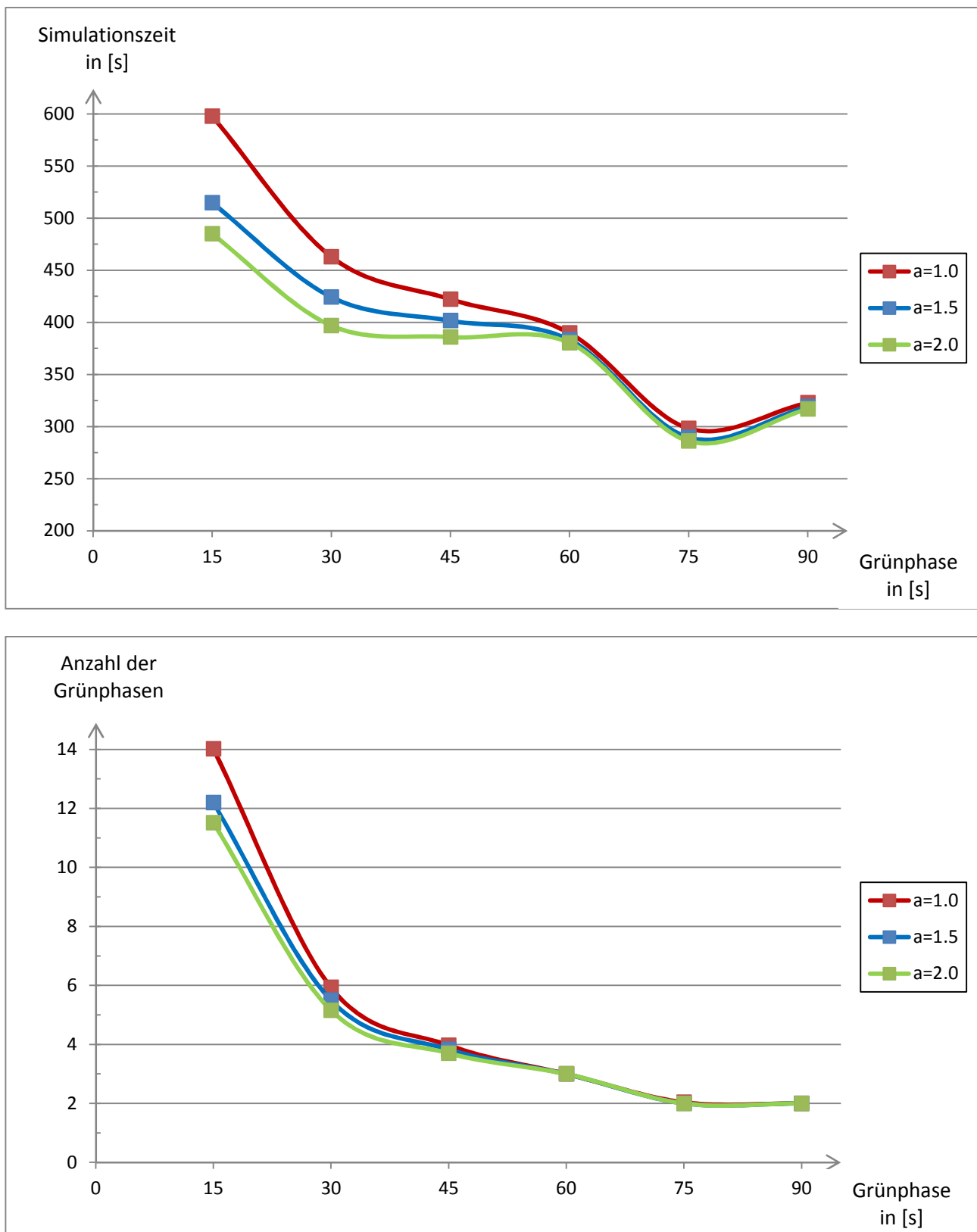


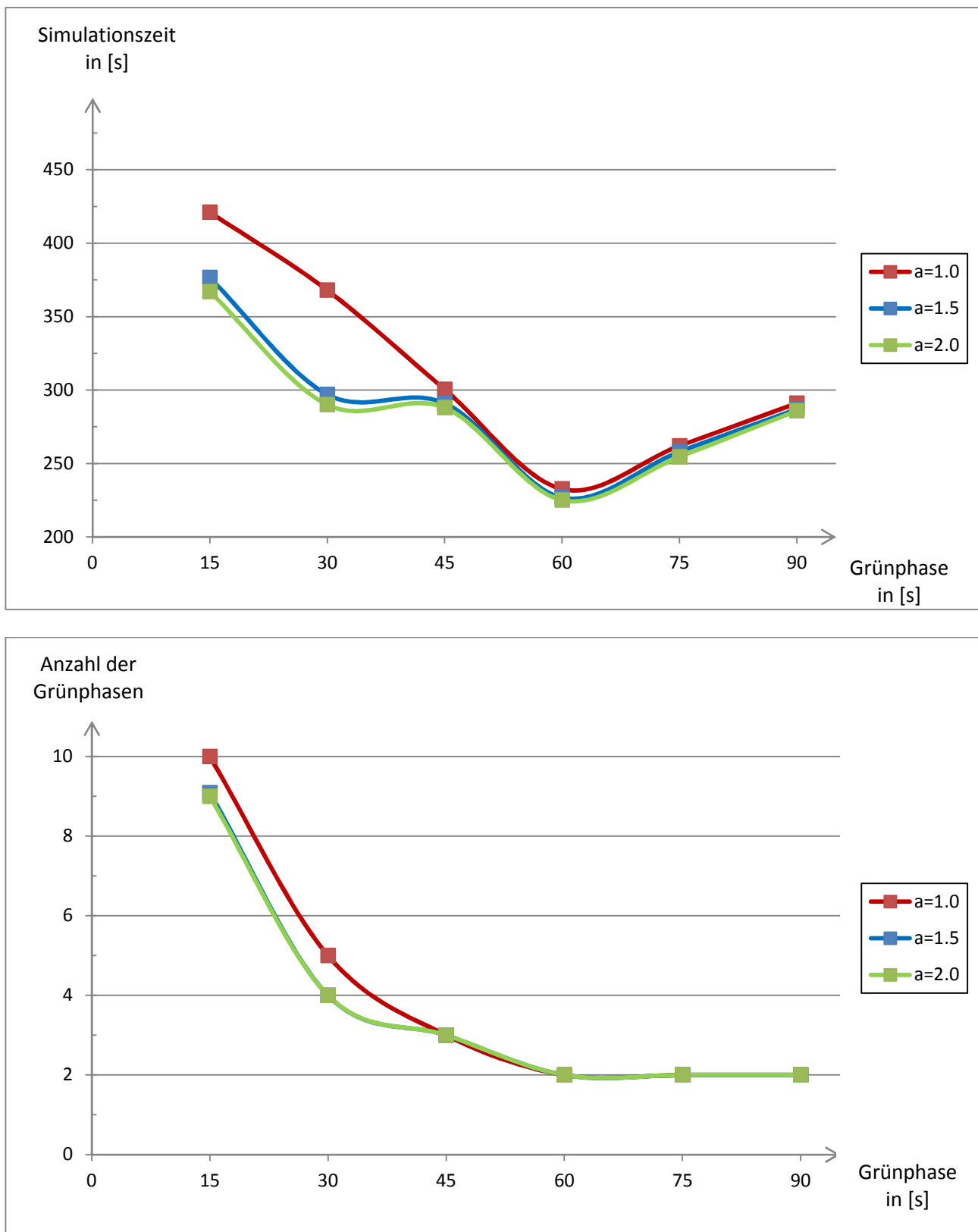
Abbildung 4-1: Simulationszeit (oben) und Anzahl der Grünphasen (unten) über der Grünphasendauer des Anfahrverhaltens „verzögertes Anfahren“

Abbildung 4-1 unten zeigt die Anzahl der Grünphasen über der Grünphasendauer. Auch hier stehen die drei Graphen für die drei simulierten Beschleunigungswerte. Die Anzahl der Grünphasen fällt bei allen Beschleunigungswerten mit der Erhöhung der Grünphase bis zur Grünphasendauer von 75 s. Ab der Grünphasendauer von 75 s bleibt die Anzahl der Grünphasen bei einem Wert von 2 konstant. Die unterschiedlichen Beschleunigungen der Fahrzeuge wirken sich lediglich bis zur Grünphasendauer von etwa 60 s auf die Anzahl der Grünphasen aus.

Das Verhalten der drei Graphen im Bereich der Grünphasendauer von 15 s bis 75 s ist in beiden Diagrammen monoton fallend. Das bedeutet, dass eine Erhöhung der Grünphasendauer, unabhängig von der Beschleunigung, einerseits die Simulationszeit (für  $a = 1 \frac{m}{s^2}$  von 600 s auf 300 s) und andererseits die Anzahl der Grünphasen (für  $a = 1 \frac{m}{s^2}$  von 14 auf 2) verringert. Ab der Grünphasendauer von 90 s steigt die Simulationszeit bei allen Beschleunigungen wieder an (bei  $a = 1 \frac{m}{s^2}$  von 300 s auf 325 s). Dies ist mit der gleichbleibenden Anzahl von Grünphasen zu begründen. Im Falle der Grünphasenlänge von 90 s (vorher 75 s) zeigt die LSA auch eine Rotphase von 180 s (vorher 150 s) an. Demzufolge stehen bei der zweiten Rotphase einerseits weniger Fahrzeuge vor der LSA. Das bedeutet, dass das letzte Fahrzeug für die Überquerung der Kreuzung weniger Zeit braucht. Andererseits dauert die Überquerung wegen der um 30 s längeren Rotphase länger. Insgesamt ergibt sich bei der Beschleunigung von  $a = 1 \frac{m}{s^2}$  eine Differenz der Simulationszeiten der beiden Grünphasen von  $325 \text{ s} - 300 \text{ s} = 25 \text{ s}$ .

#### Das Anfahren mit LSA Assistent:

Das in Abbildung 4-2 oben gezeigte Diagramm zeigt die Simulationszeit über der Grünphasendauer. Die drei Beschleunigungswerte werden durch die drei Graphen dargestellt und zeigen zunächst ein monoton fallendes Verhalten. Bei der Grünphasendauer von 60 s bildet sich ein Minimum aus. Ab diesem Punkt steigen alle Graphen monoton an. Des Weiteren ist die Simulationszeit der kleinsten Beschleunigung zu jeder Grünphasendauer am größten. Die kürzesten Simulationszeiten werden für jede Grünphasendauer bei der größten Beschleunigung erreicht.



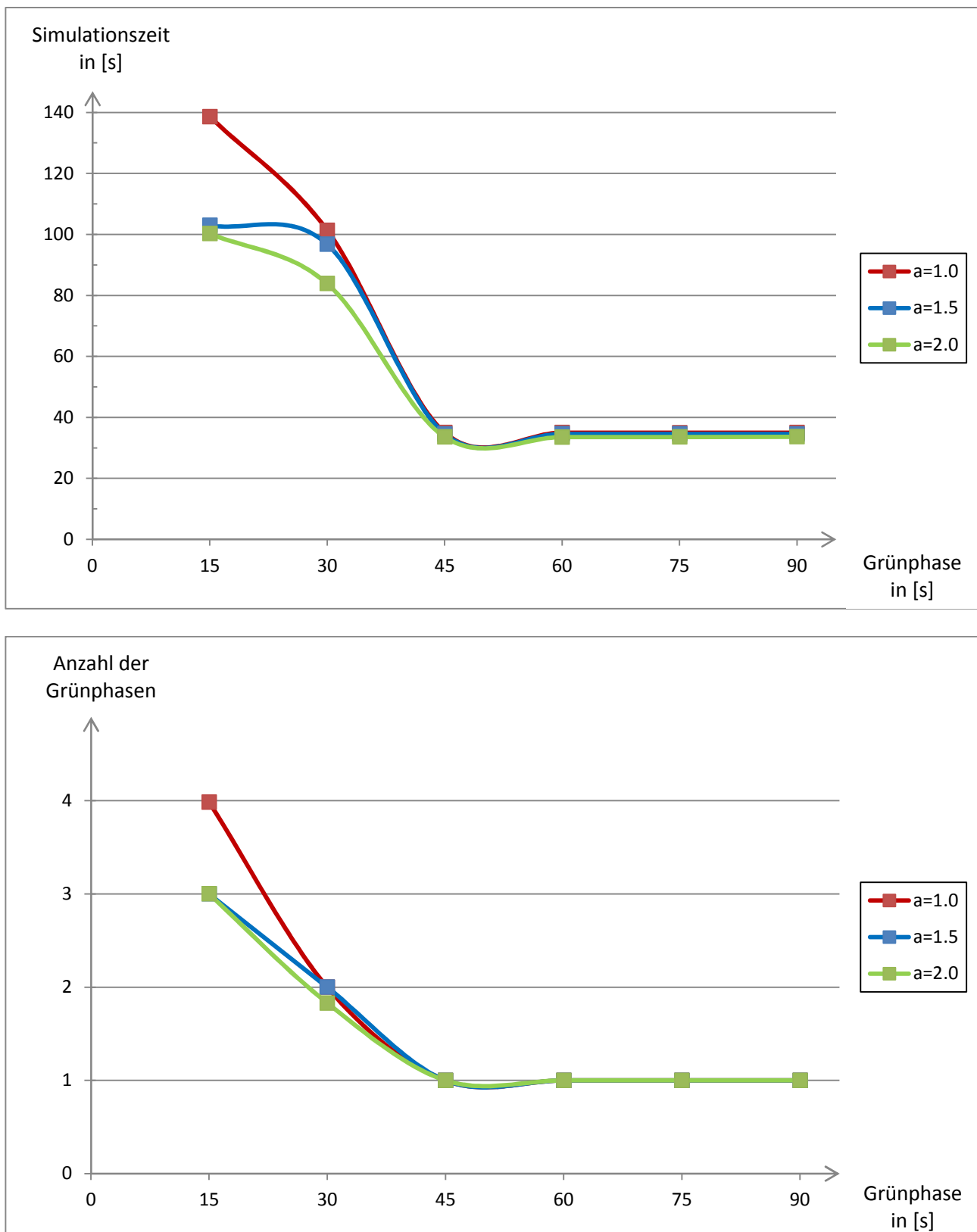
**Abbildung 4-2: Simulationszeit (oben) und Anzahl der Grünphasen (unten) über der Grünphasendauer des Anfahrverhaltens „Anfahren mit LSA Assistent“**

Abbildung 4-2 unten stellt die Anzahl der Grünphasen über der Grünphasendauer dar. Alle Graphen, die für die unterschiedlichen Beschleunigungswerte stehen, fallen bis zur Grünphasendauer von 60 s monoton. Ab dieser Grünphasendauer bleibt die Anzahl der Grünphasen konstant. Eine größere Beschleunigung ist bis zur Grünphasendauer von 45 s gleichbedeutend mit einer geringeren Anzahl von Grünphasen. Ab diesem Wert ist allerdings kein Unterschied zwischen den Graphen mehr feststellbar. Ab der Grünphasendauer von 60 s bleibt die Anzahl der Grünphasen für alle Beschleunigungen konstant.

Die Graphen in den beiden Diagrammen fallen zunächst bis zu einer Grünphasendauer von 60 s monoton (Simulationszeiten in diesem Punkt etwa 225 s, Anzahl der Grünphasen 2). Dabei sind Unterschiede zwischen den Verläufen der Graphen der Beschleunigung von  $a = 1 \frac{m}{s^2}$  einerseits und den Verläufen der Graphen der Beschleunigungswerten von  $a = 1,5 \frac{m}{s^2}$  bzw.  $a = 2 \frac{m}{s^2}$  andererseits festzustellen. In Abbildung 4-2 oben ist zu sehen, dass die Beschleunigung von  $a = 1 \frac{m}{s^2}$  im Bereich der Grünphasendauer von 15 s bis 45 s zu höheren Simulationszeiten (425 s im Vergleich zu etwa 375 s) und einer größeren Anzahl der Grünphasen (10 im Vergleich zu 9) führt. Ab der Grünphasendauer von 45 s weisen die drei Graphen jedoch nahezu gleiche Funktionswerte auf. Bei der Grünphasendauer von 60 s bildet sich für die Simulationszeit ein Minimum aus (Werte etwa 225 s). Die Anzahl der Grünphasen bleibt ab dieser Grünphasendauer konstant (Anzahl der Grünphasen 2). Anschließend steigen die Graphen der Simulationszeit monoton an (Werte etwa 290 s bei einer Grünphasendauer von 90 s). Dieses Verhalten ist, wie bereits beim „verzögerten Anfahren“ erläutert, mit der längeren Rotphase zu erklären.

#### Das Anfahren in einer Fahrzeugkolonne:

Bei dem in Abbildung 4-3 oben gezeigten Diagramm ist die Simulationszeit über der Grünphasendauer aufgetragen. Die unterschiedlichen Graphen stellen die drei Beschleunigungswerte dar. Bis zur Grünphasendauer von 45 s fallen alle Graphen monoton. Bei einer Grünphasendauer von etwa 50 s bilden sie einen Tiefpunkt aus. Ab der Grünphasendauer von 60 s bleiben die Simulationszeiten für alle Beschleunigungen konstant.



**Abbildung 4-3: Simulationszeit (oben) und Anzahl der Grünphasen (unten) über der Grünphasendauer des Anfahrverhaltens „Anfahren in einer Fahrzeugkolonne“**

Das in Abbildung 4-3 unten dargestellte Diagramm zeigt die Anzahl der Grünphasen in Abhängigkeit von den Grünphasen. In diesem Diagramm fallen alle Graphen monoton bis zu einer Grünphasendauer von 45 s. Nach einem Minimum bei der Grünphasendauer von 50 s bleibt die Anzahl der Grünphasen konstant bei dem Wert 1.

Die Verlängerung der Grünphase von 15 s bis auf 45 s bewirkt sowohl eine Abnahme der Simulationszeit als auch eine Verringerung der Anzahl der Grünphasen. Ab einer Grünphasendauer von 45 s verlaufen die Graphen nach einem Tiefpunkt bei 50 s parallel zur Abszisse. Die Tiefpunkte lassen sich mit der Simulation alleine nicht erklären. Sie kommen zustande, da die Verbindungslinie der Messwerte auf Basis einer polynomischen Annäherung errechnet wird. Diese Tiefpunkte stellen dementsprechend einen Überschwinger der Annäherungsfunktion dar und können vernachlässigt werden. Dass die Simulationszeit in diesem Szenario nicht ansteigt, obwohl die Anzahl der Grünphasen gleichbleibt (vgl. „das verzögerte Anfahren“ und „das Anfahren mit LSA Assistent“), hängt damit zusammen, dass alle Fahrzeuge die LSA bei der ersten Grünphase überqueren. Somit hat die längere Rotphasendauer in diesen Fällen keinen Einfluss auf die Dauer der Simulation. Des Weiteren kann festgehalten werden, dass die Beschleunigung bei kurzen Grünphasen einen großen Einfluss auf die Simulationszeiten hat. Im Gegensatz dazu sind die Simulationszeiten bei langen Grünphasen nahezu unabhängig von der Beschleunigung. Die einzige Bedingung ist, dass alle Fahrzeuge die LSA während der ersten Freigabezeit überqueren.

#### Fazit:

Die Auswertungen der einzelnen Szenarios haben neben dem Zusammenhang zwischen der Anzahl der Grünphasen, der Dauer der Grünphasen und der Beschleunigung auch gezeigt, welches Potential die unterschiedlichen Anfahrstrategien besitzen. Darüber hinaus lassen sich einige Aussagen für das Anfahren an LSA ableiten.

- Die drei Szenarios

Die Auswertung der drei Anfahrscenarios hat gezeigt, dass sich die Simulationszeiten des verzögerten Anfahrens, des Anfahrens mit LSA Assistent und des Anfahrens in einer Fahrzeugkolonne unterscheiden. Die nachstehende Tabelle zeigt die

Mittelwerte der Simulationszeiten über den Grünphasendauern für die jeweilige Anfahrstrategie und Beschleunigung.

	Beschleunigungswerte		
	$a = 1 \frac{m}{s^2}$	$a = 1,5 \frac{m}{s^2}$	$a = 2 \frac{m}{s^2}$
Anfahrscenario	Durchschnittliche Simulationszeit in [s]		
Verzögertes Anfahrens	415,6 s	388,8 s	375,1 s
Anfahren mit LSA Assistent	312,5 s	289,4 s	285,1 s
Anfahren in einer Fahrzeugkolonne	63,3 s	56,3 s	53,1 s

**Tabelle 4-1: Mittelwerte der Stimulationszeiten der Anfahrstrategien**

Aus den Simulationszeiten in Tabelle 4-1 lassen sich die jeweiligen Zeitersparnisse ableiten. Diese sind in Tabelle 4-2 dargestellt.

		Beschleunigungswerte		
		$a = 1,0 \frac{m}{s^2}$	$a = 1,5 \frac{m}{s^2}$	$a = 2,0 \frac{m}{s^2}$
Ausgangs-szenario	Verbessertes Anfahren durch	Durchschnittliche Zeitersparnis in [s]		
Verzögertes Anfahren	Anfahren mit LSA Assistent	103,1 (25%)	99,4 (26%)	90,0 (24%)
Anfahren mit LSA Assistent	Anfahren in einer Fahrzeugkolonne	249,2 (80%)	233,1 (81%)	232,0 (81%)
Verzögertes Anfahren	Anfahren in einer Fahrzeugkolonne	352,3 (85%)	332,5 (86%)	322,0 (86%)

**Tabelle 4-2: Durchschnittliche Zeitersparnis durch Verwendung einer anderen Anfahrstrategie**

Anhand von Tabelle 4-1 und Tabelle 4-2 wird deutlich, dass die Veränderung der Anfahrstrategie eine deutliche Zeitersparnis mit sich bringt. Ausgehend vom verzögerten Anfahren besteht die Möglichkeit durch das Anfahren mit einem LSA Assistenten die Simulationszeit um etwa 25 % zu reduzieren. Das Anfahren in einer



Fahrzeugkolonne spart weitere 80 % der Simulationszeit ein. Ausgehend vom verzögerten Anfahren ergibt sich durch das Anfahren in der Fahrzeugkolonne sogar eine Verringerung der Simulationszeit von 85 %. Die prozentualen Zeitunterschiede sind für alle drei Beschleunigungswerte etwa gleich groß.

- Grünphasenverlängerung

Die Verlängerung der Grünphasen hat zweierlei Auswirkungen auf die Anzahl der zum Räumen erforderlichen Grünphasen und die Simulationszeit verdeutlicht. Wenn die Verlängerung der Grünphase eine Verringerung der Anzahl der Grünphasen bedeutet, verkürzt sich die Zeit, bis das letzte Fahrzeug die LSA während der Freigabezeit überquert. Des Weiteren zeigt die Verlängerung der Grünphase keine Auswirkungen auf die Simulationszeit, wenn es nur eine Grünphase gibt. Ist mehr als eine Grünphase nötig, damit das letzte Fahrzeug die Kreuzung überqueren kann, muss die Verlängerung der Grünphase eine Verminderung der Anzahl der Grünphasen mit sich bringen. Ansonsten verlängert sich die Simulation. Dementsprechend muss zur Vermeidung dieses negativen Effekts die Dauer der Grünphase genau auf das Verkehrsaufkommen und die Beschleunigungen der Fahrzeuge abgestimmt werden.

- Beschleunigungswerte

Die in Tabelle 4-1 dargestellten Mittelwerte der Simulationszeiten zeigen, dass die Erhöhung der Beschleunigung unabhängig vom Anfahrszenario eine Verringerung der Simulationszeiten mit sich bringt. In Tabelle 4-3 sind die Simulationszeiten für die drei Anfahrszenarien und alle Beschleunigungen und Grünphasendauern aufgelistet. Bei der Betrachtung des verzögerten Anfahrens lässt sich eine Verringerung der Simulationszeit bei der Erhöhung der Beschleunigung von  $a = 1 \frac{m}{s^2}$  auf  $a = 1,5 \frac{m}{s^2}$  von 6 % und bei der Erhöhung der Beschleunigung von  $a = 1 \frac{m}{s^2}$  auf  $a = 2 \frac{m}{s^2}$  von 10 % erzielen. Die Einsparungen des Anfahrens mit LSA Assistent betragen bei gleichen Beschleunigungswerten 7 % bzw. 9 %. Beim Anfahren in einer Fahrzeugkolonne können 11 % bzw. 16 % der Zeit eingespart werden.

Grünphasen- dauer		15 s	30 s	45 s	60 s	75 s	90 s
	$a$ in $\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Simulationszeit in [s]					
Verzögertes Anfahren	1	597,7	462,9	422,2	389,8	298,3	322,8
	1,5	514,8	424,3	401,6	383,3	289,6	319,2
	2	484,9	396,9	385,9	380,3	286,1	316,8
Anfahren mit LSA Assistent	1	421,0	368,0	300,4	232,6	262,0	291,0
	1,5	376,5	297,0	291,0	226,8	258,0	287,0
	2	367,0	290,0	288,1	225,0	254,6	285,9
Anfahren in einer Fahr- zeugkolonne	1	138,6	101,3	35,0	35,0	35,0	35,0
	1,5	102,9	96,8	34,6	34,6	34,6	34,6
	2	100,3	83,9	33,6	33,5	33,6	33,6

Tabelle 4-3: Die Simulationszeiten der Anfahrscenarien

Es ist zu erkennen, dass die Erhöhung der Beschleunigung bei kurzen Grünphasen (beim verzögerten Anfahren und der Dauer der Grünphase von 15 s: 597,7 s bei  $a = 1 \frac{m}{s^2}$ , 514,8 s bei  $a = 1,5 \frac{m}{s^2}$  und 484,9 s bei  $a = 2 \frac{m}{s^2}$ ) einen deutlich größeren Einfluss auf die Simulationszeit hat als bei langen Grünphasen (gleiches Szenario aber eine Dauer der Grünphase von 90 s: 322,8 s bei  $a = 1 \frac{m}{s^2}$ , 319,2 bei  $a = 1,5 \frac{m}{s^2}$  und 316,8 bei  $a = 2 \frac{m}{s^2}$ ).

Weiterhin lässt sich festhalten, dass die Beschleunigung nur einen geringen Einfluss auf die Simulationszeit hat, wenn sich dadurch die Anzahl der Grünphasen nicht verringert (Beim Szenario Anfahren in einer Fahrzeugkolonne: 35,0 s bei  $a = 1 \frac{m}{s^2}$ , 34,6 s bei  $a = 1,5 \frac{m}{s^2}$  und 33,6 s bei  $a = 2 \frac{m}{s^2}$ ).

## 4.2 Kraftstoffverbrauch

Als weiterer Parameter wird der Kraftstoffverbrauch der Simulationen untersucht. Dabei wird in jeder Simulation der Kraftstoffverbrauch aller Fahrzeuge erfasst, die sich innerhalb des Simulationsaufbaus befindet.

In Abbildung 4-4 ist der Kraftstoffverbrauch aller Fahrzeuge in Litern über der Grünphasendauer aufgetragen. Die neun Graphen bilden die drei Anfahrsszenarien mit den drei unterschiedlichen Beschleunigungen ab (siehe Legende).

### Betrachtung des Anfahrsszenarios „Verzögertes Anfahren“:

Die drei Graphen weisen ein monoton fallendes Verhalten auf. Bei der Grünphasendauer von 15 s ist der größte Kraftstoffverbrauch (3,46 l) bei der kleinsten Beschleunigung festzustellen. Der Kraftstoffverbrauch der beiden anderen Beschleunigungswerte ist mit 3,16 l deutlich niedriger. Über die steigende Dauer der Grünphase kehrt sich dieses Verhalten jedoch zwischen der Grünphasendauer von 45 s und 60 s um (Kraftstoffverbrauch von allen Anfahrsszenarien um 2,5 l). Bei der Grünphasendauer von 90 s ist der Kraftstoffverbrauch der größten Beschleunigung am höchsten (2,2 l) und der Kraftstoffverbrauch der kleinsten Beschleunigung am geringsten (2,1 l). Somit ist bei der Beschleunigung von  $a = 1 \frac{m}{s^2}$  durch die Verlängerung der Grünphasendauer eine Verringerung des Kraftstoffverbrauchs von 39 % möglich (siehe Zusammenfassung dieses Abschnitts: „Vergleich der Verlängerung der Grünphasen“).

### Betrachtung des Anfahrsszenarios „Anfahren mit LSA Assistenten“:

Auch die Graphen dieses Szenarios sind monoton fallend. Mit 2,53 l ist der Kraftstoffverbrauch bei der Grünphasendauer von 15 s und der Beschleunigung von  $a = 1 \frac{m}{s^2}$  am größten. Die Kraftstoffverbrauchswerte der anderen beiden Beschleunigungen weisen mit 2,49 l ( $a = 2 \frac{m}{s^2}$ ) und 2,46 l ( $a = 1,5 \frac{m}{s^2}$ ) einen geringfügig kleineren Kraftstoffverbrauch auf. Im Bereich der untersuchten Grünphasendauer weist keines der Szenarien konstant den niedrigsten bzw. den höchsten Kraftstoffverbrauch auf. Bei der Grünphasendauer von 90 s

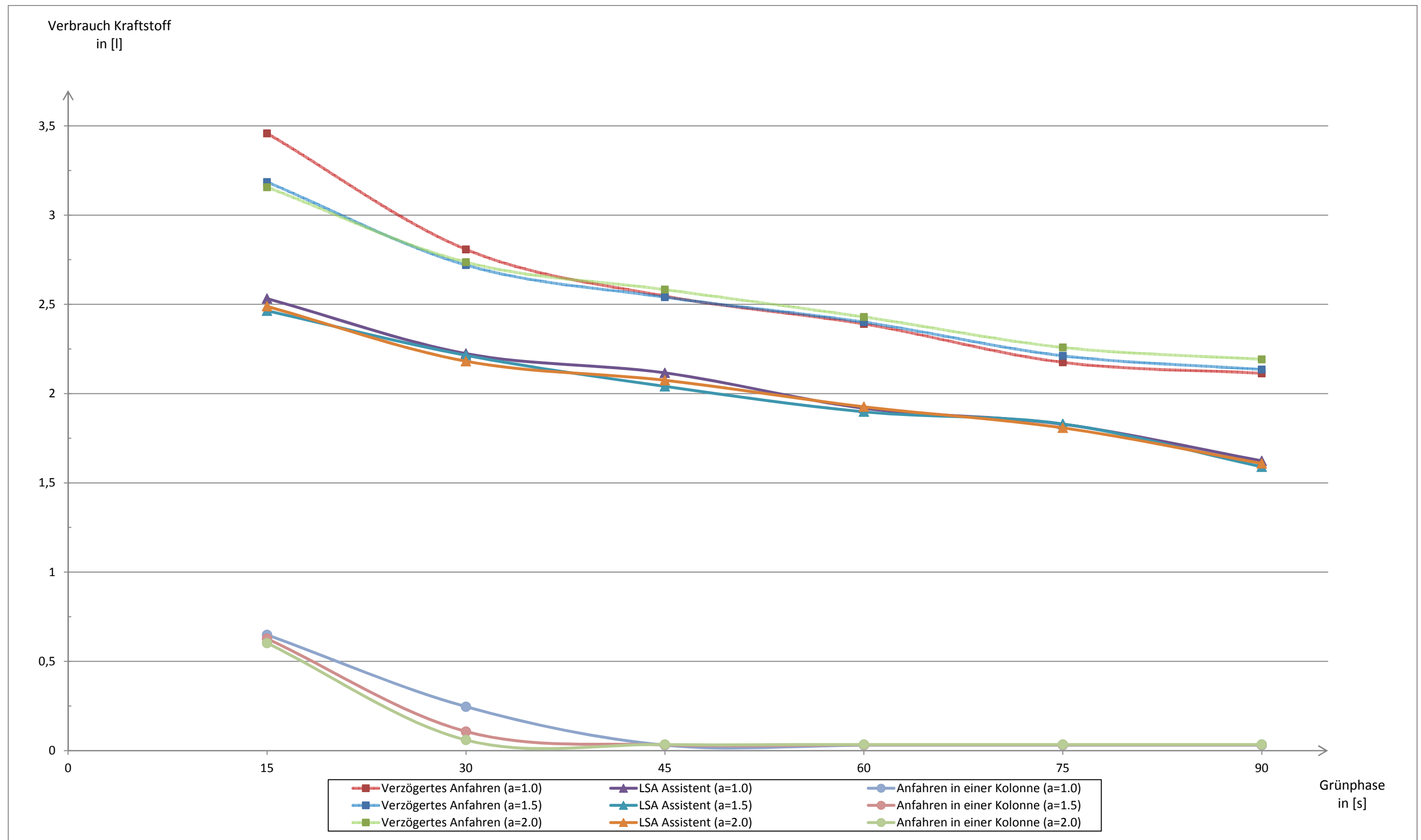


Abbildung 4-4: Vergleich aller Anfahrscenarien mit unterschiedlichen Beschleunigungen. Aufgetragen ist der Kraftstoffverbrauch über der Grünphasenlänge

liegen die Kraftstoffverbrauchswerte aller Szenarien dicht beieinander (1,6 l). Somit ist bei einer Beschleunigung von  $a = 1 \frac{m}{s^2}$  eine Verringerung des Kraftstoffverbrauchs von 36 % möglich (siehe Zusammenfassung dieses Abschnitts: „Vergleich der Verlängerung der Grünphasen“).

#### Betrachtung des Anfahrscenarios „Anfahren in einer Fahrzeugkolonne“:

Die Graphen dieses Szenarios weisen ein monoton fallendes Verhalten auf. Die drei sich ausbildenden Tiefpunkte im Bereich der Grünphasendauer von 30 s bis 45 s sind durch die polynomische Approximation zu erklären (vgl. 4.1 – Absatz: Anfahren in einer Kolonne). Die Kraftstoffverbrauchswerte der unterschiedlichen Beschleunigungen liegen bei der Grünphasendauer von 15 s mit 0,6 l bis 0,63 l sehr nahe beieinander. Nachdem die Kraftstoffverbrauchswerte bei der Grünphasendauer von 30 s etwas stärker voneinander abweichen (0,25 l bei  $a = 1 \frac{m}{s^2}$ , 0,1 l bei  $a = 1,5 \frac{m}{s^2}$  und 0,06 l bei  $a = 2 \frac{m}{s^2}$ ) laufen die Graphen anschließend nahezu deckungsgleich und parallel zur Abszisse (Kraftstoffverbrauchswerte: 0,030 l bei  $a = 1 \frac{m}{s^2}$ , 0,033 l bei  $a = 1,5 \frac{m}{s^2}$  und 0,034 l bei  $a = 2 \frac{m}{s^2}$ ). Bis zur Grünphasendauer von 90 s verändert sich der Kraftstoffverbrauch der einzelnen Szenarien nicht mehr. Durch die Verlängerung der Grünphase ist außerdem eine Verringerung des Kraftstoffverbrauchs um 95 % möglich (siehe Zusammenfassung dieses Abschnitts: „Vergleich der Verlängerung der Grünphasen“).

#### Fazit:

Auch bei der Betrachtung des Kraftstoffverbrauchs sind Abhängigkeiten von den Anfahrscenarien, der Grünphasenverlängerung und der Beschleunigungswerte festzustellen. Diese sollen anschließend aufgelistet und diskutiert werden.

- Die drei Szenarios

Bei der Betrachtung einer Grünphasendauer ist der Kraftstoffverbrauch des verzögerten Anfahrens größer als der des Anfahrens mit dem LSA Assistenten. Das Anfahren in einer Kolonne hat zu jeder Grünphasendauer den geringsten Kraftstoff-

verbrauch. So kann bei der Beschleunigung von  $a = 1,0 \frac{m}{s^2}$  und einer Grünphasendauer von 15 s der Kraftstoffverbrauch des verzögerten Anfahrens (3,5 l) durch Einführung des LSA Assistenten (2,5 l) um 40 %, durch Einführung des Anfahrens in einer Fahrzeugkolonne sogar um 80 % gesenkt werden. Die durchschnittlichen Einsparungen hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs sind in Tabelle 4-4 gezeigt. Hierbei wurde der Mittelwert des Kraftstoffverbrauchs von jeweils einem Anfahrscenario mit einer Beschleunigung über die 6 unterschiedlichen Grünphasendauern ermittelt. Das Potential der Kraftstoffverbrauchseinsparungen liegt zwischen 21 % und 95 %. Absolut lässt der meiste Kraftstoff bei der Beschleunigung von  $a = 2,0 \frac{m}{s^2}$  mit der Veränderung des Anfahrverhalts vom verzögerten Anfahren auf das Anfahren in einer Fahrzeugkolonne einsparen (2,43 l bzw. 95 %).

		Beschleunigungswerte		
		$a = 1,0 \frac{m}{s^2}$	$a = 1,5 \frac{m}{s^2}$	$a = 2,0 \frac{m}{s^2}$
Ausgangsszenario	Verbessertes Anfahren durch	Durchschnittliche Einsparung in [l] (%)		
Verzögertes Anfahren	Anfahren mit LSA Assistent	0,54 (21%)	0,53 (21%)	0,54 (21%)
Anfahren mit LSA Assistent	Anfahren in einer Fahrzeugkolonne	1,87 (92%)	1,86 (93%)	1,88 (93%)
Verzögertes Anfahren	Anfahren in einer Fahrzeugkolonne	2,41 (93%)	2,39 (94%)	2,43 (95%)

**Tabelle 4-4: Durchschnittliche Einsparungen durch Verwendung einer anderen Anfahrstrategie in Litern und Prozent**

- Grünphasenverlängerung

Wird die Dauer der Grünphasen verlängert, dann fällt der Kraftstoffverbrauch, da mehr Fahrzeuge die Simulation verlassen und somit nicht mehr zum Kraftstoffverbrauch beitragen. In Tabelle 4-5 sind die Einsparungen der Szenarien dargestellt. Sie ermitteln sich bei allen Szenarien und Beschleunigungen mittels Subtraktion des Kraftstoffverbrauchs zur Grünphasendauer von 90 s und des Kraftstoffverbrauchs zur Grünphasendauer von 15 s.

	Beschleunigungswerte		
	$a = 1,0 \frac{m}{s^2}$	$a = 1,5 \frac{m}{s^2}$	$a = 2,0 \frac{m}{s^2}$
Anfahrsszenario	Durchschnittliche Einsparung in [I] (%)		
Verzögertes Anfahren	1,3 (39%)	1,1 (33%)	1,0 (31%)
Anfahren mit LSA Assistent	0,9 (36%)	0,9 (35%)	0,9 (35%)
Anfahren in einer Fahrzeugkolonne	0,6 (95%)	0,6 (95%)	0,6 (94%)

**Tabelle 4-5: Durchschnittliche Kraftstoffersparnis der unterschiedlichen Szenarien**

Die durchschnittliche Kraftstoffeinsparung durch Verlängerung der Grünphase liegt zwischen 31% und 95%.

- Beschleunigungswerte

Die Veränderung der Beschleunigungswerte stellt eine Möglichkeit zur Verringerung des Kraftstoffverbrauchs dar. Das Kraftstoffverbrauchsverhalten wird exemplarisch am verzögerten Anfahren erläutert.

Eine Beschleunigung von  $a = 1 \frac{m}{s^2}$  führt bei kurzen Grünphasen zu einem höheren Kraftstoffverbrauch als bei längeren Grünphasen. Der Verlauf des Kraftstoffverbrauchs bei den hohen Beschleunigungswerten verhält sich gerade andersrum. Die jeweils höheren Verbräuche können mit der Anzahl der Grünphasen erklärt werden. Bei kurzen Grünphasen ist die Anzahl der Grünphasen der beiden niedrigen Beschleunigungen höher als die der höchsten Beschleunigung. Die Verlängerung Grünphase zieht nun nicht zwangsläufig eine Verringerung der Simulationszeit und eine Verringerung der Anzahl der Grünphasen nach sich (vgl. 4.1). In den Simulationen mit den höheren Beschleunigungswerten beschleunigen die Fahrzeuge stärker, sind aber trotzdem nicht in der Lage die Simulation zu verlassen. Ferner steigt der Kraftstoffverbrauch, da sich die Fahrzeuge dieselbe Zeit in der Simulation aufhalten aber durch das schnellere Anfahren mehr Kraftstoff verbrauchen. Dieser Effekt ist in Tabelle 4-6 durch die markierten Kraftstoffverbrauchswerte gekennzeichnet.

Grünphasen- dauer		15 s	30 s	45 s	60 s	75 s	90 s
Anfahr- strategie	$a$ in $\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Kraftstoffverbrauch in [l]					
Verzögertes Anfahren	1	3,46	2,81	2,55	2,39	2,18	2,11
	1,5	3,19	2,72	2,54	2,40	2,21	<b>2,14</b>
	2	3,16	<b>2,74</b>	<b>2,58</b>	<b>2,43</b>	<b>2,26</b>	<b>2,19</b>
Anfahren mit LSA Assistent	1	2,53	2,22	2,12	1,92	1,83	1,62
	1,5	2,46	2,21	2,04	1,90	1,83	1,59
	2	<b>2,49</b>	2,18	<b>2,07</b>	<b>1,93</b>	1,81	<b>1,61</b>
Anfahren in einer Fahr- zeugkolonne	1	0,65	0,25	0,030	0,030	0,030	0,030
	1,5	0,63	0,11	0,033	0,033	0,033	0,033
	2	0,60	0,06	0,034	0,034	0,034	0,034

**Tabelle 4-6: Kraftstoffverbrauchswerte bei Variation der Beschleunigung**

Die Erhöhung der Beschleunigung führt nicht bei allen Grünphasendauern und Szenarien zu einer Erhöhung des Kraftstoffverbrauchs. Dies lässt sich damit erklären, dass eine signifikante Anzahl von Fahrzeugen die Simulation verlassen konnte und somit den zuvor beschriebenen Effekt ausgleicht.

Beim Anfahren in einer Fahrzeugkolonne können bei kurzen Grünphasen die meisten Fahrzeuge in der Kolonne mitfahren, wenn die Beschleunigungswerte hoch sind. Des Weiteren verlassen viele Fahrzeuge die Simulation und werden nicht mehr in der Kraftstoffverbrauchsrechnung berücksichtigt. Ab einer Grünphasendauer von 45 s passieren alle Fahrzeuge die LSA während der Freigabezeit. Da dies für alle Beschleunigungswerte der Fall ist, ist der Kraftstoffverbrauch der Fahrzeuge, die weniger stark beschleunigen, geringer. Dementsprechend liegt der Kraftstoffverbrauch für die Simulation mit der Beschleunigung von  $a = 1,5 \frac{m}{s^2}$  (0,033 l) höher als die der geringsten Beschleunigung (0,030 l bei  $a = 1,0 \frac{m}{s^2}$ ). Die Kraftstoffverbrauchswerte der Simulation mit der Beschleunigung von  $a = 2,0 \frac{m}{s^2}$  sind am größten (0,034 l). Trotzdem liegen die Kraftstoffverbrauchswerte absolut betrachtet sehr nahe beieinander.



### **4.3 Gesamtbetrachtung**

In diesem Abschnitt soll die globale Betrachtung der Variationsparameter erfolgen. Auf Basis der Auswertungen der Simulationszeiten und des Kraftstoffverbrauchs zeigt die Tabelle 4-7 eine Übersicht der Parameter und deren Auswirkungen.

Rückschlüsse hinsichtlich der Simulationszeit	Rückschlüsse hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs
<p>Verringerung der Simulationszeit durch vernetzte Anfahrstrategie möglich</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mit der Einführung des LSA Assistenten würde eine Zeitersparnis von durchschnittlich 90 s bis 100 s (25%) einhergehen</li> <li>• Das Anfahren in einer Fahrzeugkolonne würde durchschnittlich 320 s bis 350 s (85%) Zeitersparnis bedeuten</li> </ul>	<p>Verringerung des Kraftstoffverbrauchs durch alternative Anfahrstrategien möglich</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mit dem LSA Assistenten ließen sich durchschnittlich etwa 0,5 l (21%) Kraftstoff einsparen</li> <li>• Mit dem Anfahren in einer Fahrzeugkolonne ließen sich durchschnittlich etwa 2,5 l (94%) Kraftstoff einsparen</li> </ul>
⇒ Kein Widerspruch	
<p>Grünphasenverlängerung führt nicht zwangsläufig zu einer kürzeren Simulationszeit</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nur dann, wenn die Anzahl der Grünphasen verringert werden kann</li> <li>• Oder die Anzahl der Grünphasen mit 1 den Minimalwert angenommen hat</li> </ul>	<p>Die Verlängerung der Grünphasen senkt den Kraftstoffverbrauch</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Beim verzögerten Anfahren zwischen 1 l (31%) und 1,3 l (39%)</li> <li>• Beim Anfahren mit LSA Assistenten um etwa 0,9 l (35%)</li> <li>• Beim Anfahren in einer Fahrzeugkolonne um etwa 0,6 l (95%)</li> </ul>
⇒ Kein Widerspruch, es besteht jedoch eine Abhängigkeit von einer Nebenbedingung	
<p>Optimale Beschleunigungswerte hängen von weiteren Parametern ab</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Steigende Beschleunigungswerte verkürzen die Simulation</li> <li>• Bei kurzen Grünphasen ist der Einfluss der Beschleunigungswerte groß</li> <li>• Bei langen Grünphasen ist der Einfluss der Beschleunigungswerte klein</li> <li>• Bei der gleichen Anzahl an Grünphasen haben die Beschleunigungswerte nur einen geringen Einfluss</li> </ul>	<p>Die Erhöhung der Beschleunigung senkt der Kraftstoffverbrauch nicht zwangsläufig</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nur dann, wenn die Kraftstoffverbrauchseinsparung der Fahrzeuge, die die Simulation verlassen haben, größer ist, als der Mehrverbrauch durch die höhere Beschleunigung</li> </ul>
⇒ Kein Widerspruch, es besteht jedoch eine Abhängigkeit von einer Nebenbedingung	

**Tabelle 4-7: Vergleich der Parameter „Simulationszeit“ und „Kraftstoffverbrauch“ hinsichtlich der Variationsparameter „Verlängerung der Grünphase“, „Erhöhung der Beschleunigung“ und der „Variation des Anfahrscenarios“**

Es lässt sich festhalten, dass das Anfahrverhalten durch die Variationsparameter sowohl hinsichtlich Simulationszeit (also der Aufenthaltsdauer des letzten Fahrzeugs und entsprechend auch im Hinblick auf den Durchsatz) als auch hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs optimiert werden kann.

- Das Anfahrscenario

Durch die Verwendung von alternativen Anfahrstrategien ist eine durchschnittliche Verringerung der Simulationszeit zwischen 25% und 85% bei der gleichzeitigen durchschnittlichen Verringerung des Kraftstoffverbrauchs um 21% bzw. 94% möglich.

- Grünphasenverlängerung

Bei der Verlängerung der Grünphase verringert sich der Kraftstoffverbrauch aller Szenarien zwischen 31% und 95%. Die Simulationszeit sinkt nicht zwangsläufig mit dieser Verlängerung.

- Beschleunigungswerte

Die Erhöhung der Beschleunigungswerte führt zu einer kürzeren Simulationszeit. Der Einfluss der Beschleunigungswerte hängt dabei von der Länge der Grünphase ab. Eine Verringerung des Kraftstoffverbrauchs ist nur unter Umständen gegeben. So müssen die Kraftstoffverbrauchseinsparungen durch die Fahrzeuge, die die Simulation verlassen haben größer sein, als der Mehrverbrauch aller Fahrzeuge durch die höheren Beschleunigungswerte.

Durch die Verwendung von LSA Assistenzsystemen wäre in einem ersten Schritt eine Zeit- und Kraftstoffeinsparung möglich. Eine weitere Möglichkeit zur Einsparung ergibt sich durch die zusätzliche Anpassung der Grünphasendauern. Sie müssten dabei dem Verkehrsfluss der Kreuzung angepasst sein. Je länger die Grünphasen sind, desto weniger Kraftstoff wird durch den energieaufwendigen Anfahrvorgang verbraucht. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Grünphasendauer auch hinsichtlich des Durchsatzes optimiert wer-

den muss. Außerdem kann durch die Wahl einer optimalen Beschleunigung der minimale Kraftstoffverbrauch und die maximale Zeitersparnis erreicht werden.

Der nächste Schritt der Verbesserung besteht in der Einführung des „Anfahren in einer Fahrzeugkolonne“ Anfahrscenarios, durch das der in dieser Simulation mit Abstand geringste Kraftstoffverbrauch und die maximale Zeitersparnis erzielt wurden.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde das Anfahrverhalten von 50 Fahrzeugen untersucht, die sich in einem Rückstau vor einer Lichtsignalanlage (LSA) befunden haben. Der Aufbau der Simulation bestand aus einer durch LSA gesteuerten Kreuzung, deren einzige Fahrtrichtung jeweils die Geradeausfahrt war. Als Simulationsumgebung wurde SUMO verwendet. Durch eigens entworfene Skripte in Python, die eine Verbindung zum TraCI (Traffic Control Interface) aufbauten, wurde die statische Simulationsumgebung zu einer dynamisch veränderbaren Oberfläche aufgewertet.

Das Ziel der Arbeit war die Untersuchung und Auswertung von drei unterschiedlichen Anfahrscenarien. Zum einen wurde das derzeitige Anfahrverhalten abgebildet. Zum anderen wurden zwei Fahrerassistenzsysteme betrachtet. Das eine Assistenzsystem unterstützte den Fahrer während des Beschleunigungsvorganges. Der andere Assistent übernahm vollautomatisch die Längsführung der Fahrzeuge. Für die beiden Assistenten wurde die Vehicle-to-X Technologie mit einer Durchdringungsrate von 100% vorausgesetzt.

Es wurde gezeigt, dass durch die Variation der Anfahrstrategie eine Verkürzung der Simulationszeiten (und somit auch eine Verkürzung der Aufenthaltsdauer des letzten Fahrzeugs) von 90 s (25%) bis 350 s (85%) möglich ist. Die Einsparungsmöglichkeiten hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs liegen zwischen 0,5 l (21%) und 2,5 l (94%). Weiterhin wurden mit der Grünphasendauer und dem Beschleunigungswert weitere Parameter identifiziert, die bedeutenden Einfluss auf den Ablauf der Simulation und das Potential zur Reduzierung der Simulationszeit und des Kraftstoffverbrauchs haben.

Durch die Verbesserung des Anfahrverhaltens mithilfe eines „LSA Assistenten“ wäre in einem ersten Schritt eine Einsparung von 0,5 l (21%) pro Kreuzung und Fahrzeugkolonne von 50 Fahrzeugen möglich. Die Verwendung von aufeinander abgestimmten Grünphasenschaltungen würde ein weiteres Einsparpotential von 0,9 l (35%) bedeuten. In einem weiterführenden Schritt könnte der Kraftstoffverbrauch des „Anfahrens mit LSA Assistenten“ durch das „Anfahren in einer Fahrzeugkolonne“ um weitere 1,88 l (93%) gesenkt werden.

Diese ersten Ergebnisse zeigen, dass die Einführung von alternativen Anfahrscenarien einen deutlichen Vorteil hinsichtlich Kraftstoffverbrauch und Durchsatz bringt. In weitergehenden Untersuchungen müsste die Auswirkung einer geringeren Durchdringungsrate und einer größeren Anzahl von Fahrzeugklassen auf die Ergebnisse überprüft werden. Weiterhin ließe sich der Einfluss des Abbiegeverhaltens untersuchen, der in dieser Simulation nicht betrachtet wurde. An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Simulationsumgebung auf einer Zeitrechnung basiert, die als kleinste Zeiteinheit ganzzahlige Sekundenwerte zulässt. Eine kleinere Einteilung der Zeitintervalle würde ebenfalls eine genauere Steuerung der Fahrzeuge ermöglichen und möglicherweise genauere Ergebnisse liefern.

Wenn die weitergehenden Untersuchungen den Nutzen der alternativen Anfahrstrategien bestätigen, dann besteht noch immer das Problem der Umsetzung der Anfahrassistenten. Denkbar ist ein haptisches, akustisches oder visuelles Signal das entweder innerhalb oder außerhalb des Fahrzeugs gesendet wird. Dadurch ist es möglich, dem Fahrer den optimalen Anfahrzeitpunkt und die erforderliche Beschleunigung mitzuteilen. Wenn die Assistenzsysteme die Steuerung gänzlich übernehmen, ist es weiterhin möglich, den Fahrer mithilfe der bereits geschaffenen Schnittstellen über das Geschehen zu informieren.

Schließlich muss der Nutzen des LSA Assistenten und des Anfahrens in einer Fahrzeugkolonne durch Feldversuche in der Realität gezeigt werden. Diese könnten im Rahmen der AIM-Studie des DLR erfolgen. Bei der Studie wurden alle LSA des Braunschweiger Rings mit kooperativen Fahrerassistenzsystemen ausgestattet. Daher eignet sich diese Strecke für die Erprobung der Anfahrscenarien in realen Umgebungsparametern [AIM11].

## 6 Literaturverzeichnis

- [AIM11] Frankiewicz, T.; Hannibal, M.; Köster, F. (Hrsg.); Lemmer, K.: Anwendungsplattform Intelligente Mobilität (AIM) – Dienstespektrum und Architektur,” in AAET 2011. Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel, 2011.
- [ECC07] Electronic Communications Committee: Compatibility studies in the band 5855– 5925 MHz between intelligent transport systems (ITS) and other systems. Bern, 2007
- [ETSI09] European Telecommunications Standards Institute (ETSI), ETSI BSA: ETSI TR 102 638 – Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Definitions, V1.1.1 ed. 2009
- [FEL01] Fellendorf, M.: Von der Empirie zum integrierten Verkehrsmanagement. Vortrag am 05.02.2001 in Zürich.
- [FGSV10] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsmanagement: Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA). FGSV e.V. Köln, 2010
- [NIC01] Nickel, M.: Diplomarbeit im Bereich Unfallrekonstruktion. 2001
- [OEAV] Krajzewicz, D. et al: Ökologische Einflüsse ausgewählter Verkehrsmanagementansätze
- [SIMTD] simTD: simTD Deliverable D11.1 – Beschreibung der C2XFunktionen, V1.0 ed., Sicher Intelligente Mobilität – Testfeld. Deutschland, 2009
- [STLCS] Brockfeld, E.; Krajzewicz (Hrsg.), D. et al: Simulation of modern Traffic Lights Control Systems using the open source Traffic Simulation SUMO
- [TS11] DLR e.V., Institut für Verkehrssystemtechnik (Institute of Transportation Systems): SUMO – Simulation of Urban Mobility. Zugriff im Zeitraum vom 18.04.2011 bis zum 13.06.2011 unter <http://sumo.sourceforge.net/>
- [UWB11] Umweltbundesamt: HBEFA - Handbook Emission Factors for Road Trans-

port. Zugriff am 30.05.2011 unter <http://www.hbefa.net>

[VATLA] Lübke, A.; Hellbrück, H.; Wegener (Hrsg.), A.; Wewetzer, C.: VANET Simulation Environment with Feedback loop and its application to traffic light assistance

[VW11] Volkswagen Deutschland. Zugriff am 31.05.2011 unter <http://www.volkswagen.de/de.html>



# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Die Technik der Vehicle-2-X Kommunikation im Fahrzeug [AIM11] .....	4
Abbildung 2-2: Aufbau einer LSA mit Vehicle-2-X Kommunikation [AIM11].....	5
Abbildung 3-1: Der untersuchte Simulationsaufbau .....	9
Abbildung 3-2: Anbremsvorgang der Fahrzeuge an die LSA .....	10
Abbildung 3-3: Beispielhafte Simulation für die unterschiedlichen Anfahrstrategien.....	11
Abbildung 3-4: Das verzögerte Anfahren .....	12
Abbildung 3-5: Das Anfahrverhalten mit dem LSA Assistenten.....	12
Abbildung 3-6: Das Verhalten der Fahrzeuge im Szenario „Anfahren in einer Fahrzeugkolonne“ .....	13
Abbildung 3-7: Längsbeschleunigungen von normalen (links) und sportlichen (rechts) Fahrern [NIC01] .....	16
Abbildung 3-8: Der Sumo Manager beim ersten Start.....	18
Abbildung 3-9: Erzeugung eines neuen Simulationsaufbaus.....	19
Abbildung 3-10: Erzeugung der Fahrzeugklassen für die Simulationen.....	20
Abbildung 3-11: Auszug aus dem Quelltext der „environment.py“ .....	22
Abbildung 3-12: Das Flussdiagramm der Funktion zum Ermitteln der über die LSA gelangenden Fahrzeuge .....	24
Abbildung 3-13: Weg-Zeit-Verhalten ( $a = 1ms^2$ ).....	25
Abbildung 3-14: Weg-Zeit-Verhalten ( $a = 2ms^2$ ).....	26
Abbildung 3-15: Das Flussdiagramm der Funktion zum Steuern der Fahrzeuge.....	27
Abbildung 3-16: Der Ablaufplan der Funktion zum Ermitteln der Fahrzeugkolonne .....	29
Abbildung 3-17: Flussdiagramm zur Steuerung der Fahrzeuge in der Kolonne .....	30
Abbildung 4-1: Simulationszeit (oben) und Anzahl der Grünphasen (unten) über der Grünphasendauer des Anfahrverhaltens „verzögertes Anfahren“ .....	34
Abbildung 4-2: Simulationszeit (oben) und Anzahl der Grünphasen (unten) über der Grünphasendauer des Anfahrverhaltens „Anfahren mit LSA Assistent“ .....	36
Abbildung 4-3: Simulationszeit (oben) und Anzahl der Grünphasen (unten) über der Grünphasendauer des Anfahrverhaltens „Anfahren in einer Fahrzeugkolonne“ .....	38
Abbildung 4-4: Vergleich aller Anfahrscenarien mit unterschiedlichen Beschleunigungen. Aufgetragen ist der Kraftstoffverbrauch über der Grünphasenlänge .....	44

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Parameter der Fahrzeugklassen [VW11] .....	10
Tabelle 3-2: Auflistung der wichtigsten Kenngrößen der Simulation .....	32
Tabelle 4-1: Mittelwerte der Stimulationszeiten der Anfahrstrategien .....	40
Tabelle 4-2: Durchschnittliche Zeitersparnis durch Verwendung einer anderen Anfahrstrategie .....	40
Tabelle 4-3: Die Simulationszeiten der Anfahrszenarien .....	42
Tabelle 4-4: Durchschnittliche Einsparungen durch Verwendung einer anderen Anfahrstrategie in Litern und Prozent .....	46
Tabelle 4-5: Durchschnittliche Kraftstoffersparnis der unterschiedlichen Szenarien .....	47
Tabelle 4-6: Kraftstoffverbrauchswerte bei Variation der Beschleunigung .....	48
Tabelle 4-7: Vergleich der Parameter „Simulationszeit“ und „Kraftstoffverbrauch“ hinsichtlich der Variationsparameter „Verlängerung der Grünphase“, „Erhöhung der Beschleunigung“ und der „Variation des Anfahrszenarios“ .....	50